JULI 2005 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

> EINSTEIN-SERIE:
Einstein im Supercomputer



> Getreide der Zukunft

> Therapie mit Virtual Reality

> ESSAY: Frühreife Neandertaler

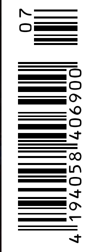
www.spektrum.de

ASTROPHYSIK

Explodierende Sterne

Mit Supercomputern und Superteleskopen ergründen Forscher das Drama der Supernovae

D6179E
13,50 sFr/Luxemburg 8,– €



MEDIZIN

Das Marihuana des Gehirns

EVOLUTION

Kälteresistente Dinosaurier in Alaska

INTERNET

Die Zukunft der Spam-Abwehr



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Umbruch und Aufbruch auf Russisch

Lange nichts gehört von russischer Wissenschaft. Dabei würden wir Ihnen gerne von Zeit zu Zeit Spitzenforschung auch aus diesem großen Land des europäischen Ostens präsentieren. Doch damit sieht es nicht sonderlich gut aus. Die Gründe dafür konnte ich kürzlich auf einer Journalistenreise durch Russland erfahren, die von der Bosch-Stiftung ausgerichtet wurde.

Wir besichtigten Institute und sprachen mit Forschern in St. Petersburg, Moskau und Nowosibirsk. Trotz manch hoffnungsvoller Pflänzchen und großen Engagements einzelner Wissenschaftler bot sich uns ein weit gehend desolates Bild. Seit 1990 erlebt und erleidet die russische Wissenschaft einen permanenten Niedergang. Seitdem, so berichtet Leonid Gokhberg von der Moskauer Higher School of Economics, ist das Personal in Forschung und Entwicklung von zwei Millionen auf 850 000 gesunken. Der Grund für den Aderlass: Damals brach vielen Instituten die staatliche Förderung weg. »Und dieser Trend geht weiter«, sagt der Wirtschaftsforscher. »Wir haben 15 Jahre verloren.«



BEIDE FOTOS: DETMAR MODES

Zeit zum Aufbruch: Studenten vor der Lomonossow-Universität in Moskau; links oben: Dr. Leonid Gokhberg

Die Folge war nicht nur ein Braindrain, der zehntausende Akademiker vor allem ins westliche Ausland trieb. Viele junger Forscher wechselten auch in die Wirtschaft, weshalb die Generation der 30- bis 45-Jährigen jetzt für einen Wiederaufbau fehlt. Nur wenige kehrten bisher zurück, die Anreize sind zu gering. Doktoranden oder Jungforscher müssen sich in der Regel Geld dazuverdienen, etwa als Grundschullehrer. Hinzu kommt die Krise der Russischen Akademie der Wissenschaft. Ihre etwa 1200 Mitglieder, im Schnitt 70 Jahre und nicht selten eher Funktionäre als Spitzenforscher, kämpfen um ihre Privilegien. Von rund 2500 Instituten landesweit sollen gerade mal 250 übrig bleiben – kein Wunder, wenn es in der Wissenschaft gärt.

Zur Qualität der Forschung trägt nicht unbedingt bei, dass die Institute sich ihr Geld wenigstens zu 50, manche sogar zu 75 Prozent selbst besorgen müssen. Sie tun dies, indem sie die eigenen Werkstätten kommerziell nutzen – durch Produktion einfacher Geräte, etwa für Kühlanlagen oder Autozubehör. Neugegründete Institute leben zum Teil von Zuwendungen ihrer westlichen Partner, für die sie eher Zulieferarbeiten erledigen.

Dass wir von russischer Spitzenforschung so wenig erfahren, liegt aber nicht nur an solchen Zuständen. Mir ist auch keine Öffentlichkeitsarbeit aufgefallen, die interessante Themen vermitteln könnte. Der Versuch, sich mit Wissenschaftsjournalisten in Moskau zu treffen, schlug ebenfalls fehl – Anfragen wurden nicht einmal beantwortet. »Anfangs hatte ich Probleme zu erklären, was Perestroika ist«, erzählt ein Physiker aus Nowosibirsk mit fröhlichem Sarkasmus. »Heute ist das einfach: Perestroika ist Destroika.« Da kann es freilich noch etwas dauern, bis wir wieder über russische Forschung berichten können (siehe auch www.wissenschaft-online.de/russland).

JULI 2005

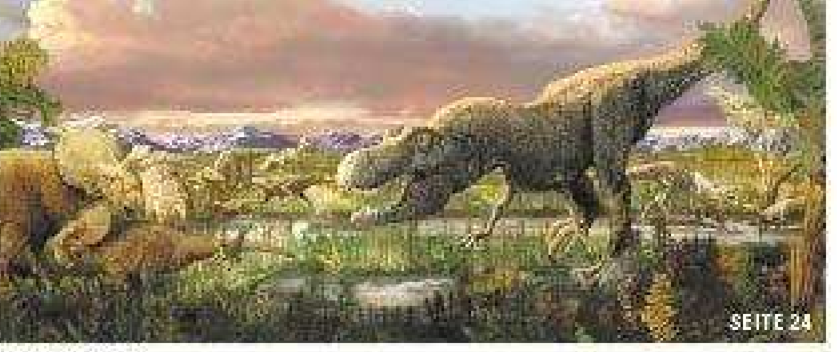
SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

THEMEN

Titelbild: Der Krebsnebel (M1, NGC 1952) im Sternbild Stier, rund 6000 Lichtjahre von der Erde entfernt, ist der Überrest einer Supernova, die im Jahr 1054 von chinesischen Astronomen beobachtet wurde
Bildnachweis: Eso

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet

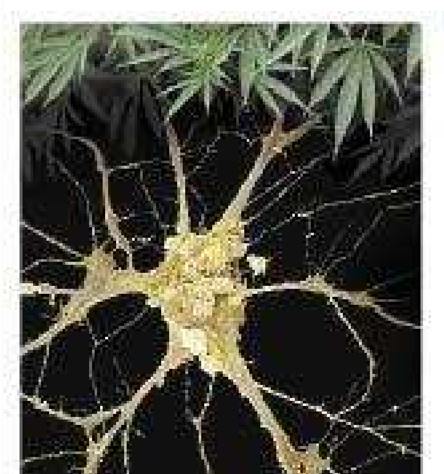


SEITE 24

PALÄONTOLOGIE

Dinosaurier der Arktis

Die Reptilienriesen passten sich sogar dem arktischen Klima und dem dunklen Winter Nordalaskas an. Kurz vor dem Ende der Dinosaurierzeit lebten dort mindestens acht Arten von ihnen



SEITE 48

MEDIZINISCHE FORSCHUNG

Das Marihuana des Gehirns

Das Gehirn bildet selbst Stoffe, die ähnlich wie Cannabis wirken. Sie helfen Hunger, Angst oder etwa Schmerz zu regulieren. Entsprechende Medikamente könnten bei manchen Krankheiten und Behandlungen nützen – ohne die Nebenwirkungen der Rauschdroge



SEITE 56

VISUALISIERUNG

Einsteins Holodeck

Wer sagt, dass die Relativitätstheorie unanschaulich ist? Computersimulationen illustrieren auf anschauliche Weise die visuellen Effekte von Einsteins Theorien

EBENFALLS ZUM THEMA: spektrum-plus.de
ZUSATZANGEBOT FÜR ABONNENTEN

SEITE 70

ETHNOLOGIE

Die zehn Geschlechter von Amarete

Wann ist ein Mann ein Mann? In dem Indiodorf Amarete lässt sich diese Frage nicht leicht beantworten, denn außer dem biologischen gibt es dort auch symbolische Geschlechter. Sicher ist nur: Männliche Männer sitzen rechts





TITELTHEMA ASTROPHYSIK SEITE 36

Rätselhafte Supernovae

Jahrelang gelang es Forschern nicht, die Sternexplosionen im Computer zu simulieren. Eine Gruppe am Max-Planck-Institut für Astrophysik zeigt, wie sie mit aufwändigen 3-D-Rechnungen eine bislang ungeahnte Vielfalt von Supernova-Phänomenen in den Griff bekommen

SEITE 76

PSYCHOLOGIE

Cyber-Therapie

In virtuellen Räumen kämpfen Patienten gegen ihre Spinnenphobie, Brandopfer lenken sich von ihren Schmerzen ab. Vermutlich helfen solche künstliche Welten sogar Terroropfern, ihre Erlebnisse zu verarbeiten



SEITE 84

GETREIDEZUCHT

Uralte Gene für neue Getreidesorten

Mit Genen aus Wildgräsern erzielen Züchter unvermutete Ertragssteigerungen. Die neuen Zuchtmethoden erlauben viel schnellere Erfolge als früher – auch wenn die Ziele letztlich seit Jahrtausenden gleich geblieben sind

SEITE 92

E-MAILS

Immer Ärger mit Spam

Im Kampf gegen die tägliche Milliardenflut unerwünschter E-Mails benutzen die Softwareingenieure jetzt auch Methoden der Künstlichen Intelligenz



JULI 2005

REZENSIONEN

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

JUNGE WISSENSCHAFT

KOMMENTAR

WISSENSCHAFT IM ...

WEITERE RUBRIKEN

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN



Bewegung am kosmischen Tempolimit

Verglichen mit Licht bewegen wir uns im Alltag extrem langsam fort. Doch Computersimulationen im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie erlauben es uns, fast lichtschnelle Objekte einfach mal anzuschauen.

Siehe auch: Einsteins Holodeck S. 56

LESERBRIEFE

Umweltgifte vom Gabentisch der Natur

Juni 2005

Auf S. 43 wird die südafrikanische Pflanze *Dichapetalum cymosum* beschrieben. Deren Giftstoff ist die Monofluoressigsäure; mit einem Fluoratom pro Molekül. In dem kleinen Bild ist zwar die richtige Strukturformel dieser Substanz eingefügt, jedoch versehentlich mit dem falschen Begriff Trifluoressigsäure – welche drei Fluoratome pro Molekül enthält – bezeichnet worden. Ansonsten finde ich diesen Artikel über die Chemie von Pflanzen, Tieren und Meeresorganismen hochinteressant.

Günter Bedessem, Mainz-Kastell

Die Zwerge von Flores

März 2005

Nicht nur in der Technik, auch in der Evolution spielt die Minimierung des Energieverbrauchs eine große Rolle. Das menschliche Gehirn ist, im Verhältnis zu seiner Masse, der größte Energieverbraucher. Es macht nur zwei Prozent des Körpergewichts aus, verbraucht aber über zwanzig Prozent der Energie. Bei Nahrungsknappheit kann also hier am meisten gespart werden.

Großwildjagd und Geräteherstellung war den Vorfahren schon bekannt, die Evolution brauchte also nur die Gehirnstrukturen zu konservieren, die diese Fähigkeiten enthielten.

Wenn in 200 oder 500 Jahren der Golfstrom versiegt (siehe »Das sprunghafte Klima« in derselben Ausgabe), dann wird es in Nordamerika und Europa kalt, trocken und windig werden. An eine Nahrungsmittelproduktion im heutigen Stil ist in diesen Gebieten dann nicht mehr zu denken. Wie auf Flores wird auch auf der »Insel Erde« für den Menschen Nahrungsknappheit Evolutionsfaktor Nummer 1 sein.

Und in 18000 Jahren werden dann vielleicht einige Exemplare von Homo postsapiens angestrengt überlegen, wozu Homo sapiens ein solch großes Gehirn brauchte, wenn er damit nur Techniken entwickelte, die zu seinem Untergang führten.

Harald Merten, Bodnegg

Tsunami-Katastrophe

Leserbrief, Juni 2005

Der Leser meint, die Tsunami-Welle sei keine Oberflächenwelle, sondern eine Druckwelle. Dies ist falsch. Bei den Tsunami-Wellen handelt es sich um so genannte lange Schwerewellen, bei denen die Wellenlänge groß im Vergleich zur Wassertiefe ist. Bei dieser Art von Oberflächenwellen ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit gegeben durch die Wurzel aus Erdbeschleunigung mal Wassertiefe, was bei einer Wassertiefe von 5000 Metern zu einer Geschwindigkeit von rund 800 km/h führt. Die enorme Energie der Tsunami-Welle steckt in der Bewegungsenergie des Wassers bis hinunter zum Meeresboden. Die winzige Erhöhung des Wasserdrucks am Meeresboden ist nur durch die Amplitude im Vergleich zu der Wassertiefe gegeben. Diese wird aber zur Detektion der Tsunami-Welle durch sehr empfindliche Drucksensoren auf dem Meeresboden ausgenutzt.

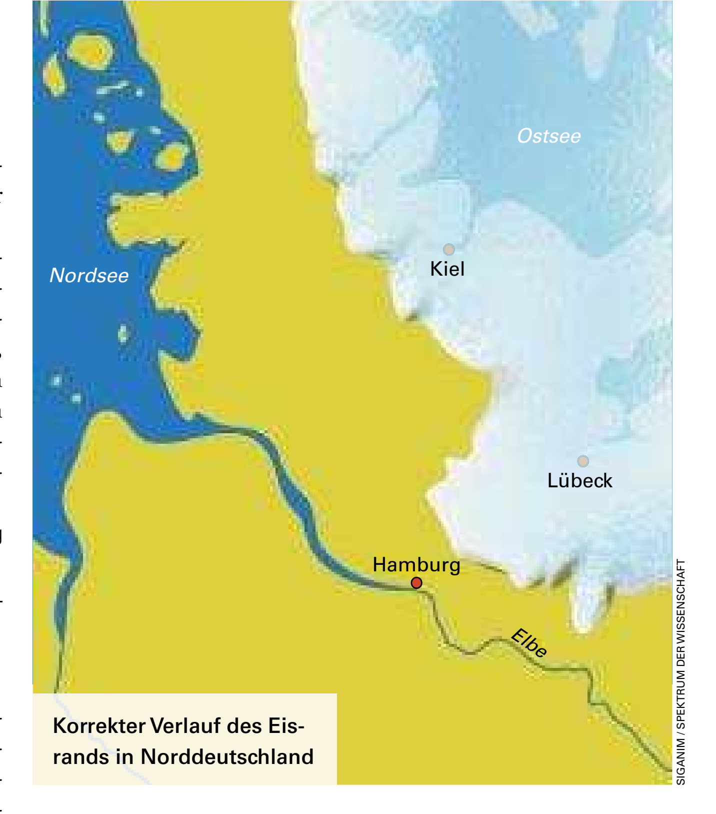
Prof. Wilfried Schoepe, Regensburg

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: 06221 9126-729



Korrekter Verlauf des Eisrands in Norddeutschland

Das Ende der letzten Eiszeit

Mai 2005

Auf S. 63 bringen Sie eine Kartenskizze der größten Ausdehnung des Eises zur Weichseleiszeit. Beim überwiegend gesicherten Verlauf sollte man aber in einer modernen Abhandlung trotz des relativ kleinen Maßstabs korrekt arbeiten, handelt es sich doch um einen Fehler in der Größenordnung von rund 100 km (er beträgt in der Originalzeichnung einen vollen Millimeter).

So wird ganz Schleswig-Holstein als vereist gekennzeichnet, obwohl der gesamte Westen durch die Saalevereisung im weiteren Sinne sowie durch die fluvioglazialen (also westlich des Eisrands gelegenen) Ablagerungen der Weichselvereisung gekennzeichnet sind.

Übrigens knickt der Außenrand der Weichselvereisung im Norden von Jütland, in der Höhe des Limfjords, scharf nach Westen um. Im äußersten Norden Jütlands erreichen die Moränen der Weichselvereisung also tatsächlich die Nordsee.

Prof. Jürgen Newig, Kiel

Immer wieder sonntags ...

Forschung aktuell, April 2005

Kaum merkliche Änderung mit Silvester

R.C. Henry schlägt vor, das Jahr auf 364 Tage zu verkürzen und dafür alle paar Jahre eine Schaltwoche einzufügen. Der Kalender würde dadurch regelmäßiger.

Es liegt jedoch näher, die Länge des Jahres unverändert zu lassen, einschließlich gelegentlicher Schalttage und Schaltsekunden, dafür aber einen Tag (alle vier Jahre zwei Tage) keiner bestimmten Woche zuzuordnen. Das könnte der letzte Tag des Jahres sein, den man dann zum Beispiel Silvester oder Schalttag nennen könnte. Die Wocheneinteilung bliebe dann von Jahr zu Jahr gleich. Die Änderung wäre kaum merklich.

In der Wirtschaft ist der Bezug auf Nummern von Kalenderwochen schon weit verbreitet. Auffallender wäre es, wenn man auch die Monatseinteilung an der Teilbarkeit orientieren wollte. Man könnte die 364 Tage in 13 Monate zu je vier Wochen aufteilen. Die Mondphasen würden sich dann von Monat

zu Monat kaum verschieben, und traditionell am Mondkalender orientierte Feiertage könnten in diesem Sonnenkalender ein gleich bleibendes Datum erhalten und also immer am selben Wochentag sein. Sollte die Benennung des dreizehnten Monats Schwierigkeiten machen, schlage ich vor, alle Monate einfach wie in vielen Sprachen üblich zu nummerieren.

Dr. Werner Fuß, Garching

Idee schon in »Herr der Ringe«

Eine interessante Randnotiz ist vielleicht, dass die Idee von Herrn R.C. Henry nicht wirklich neu ist. So kann man zum Beispiel auch in J.R.R. Tolkiens »Herr der Ringe« im Anhang D einen 30-tägigen Kalender finden, den des »Auenlandes«, bei dem ebenfalls jeder Tag im Jahr auf den gleichen Wochentag fällt.

Andreas Schneider, Leipzig

Das sprunghafte Klima

März 2005

Der Artikel beschäftigt sich eingehend mit einer Kaltzeit, die die Nordhalbkugel zukünftig treffen könnte, nicht aber mit einer schon auf der Südhalbkugel gegenwärtig bestehenden Eiszeit. Da auf Letzterer das Land-Meer-Verhältnis wesentlich anders ist als auf der Nordhälfte der Erde, wird der dortige eiszeitliche Zustand durch den überwiegenden Meeresanteil verschleiert.

Das sieht jedoch ganz anders aus, wenn man die Umrisse des antarktischen Kontinents in Gedanken auf die Nordpolargegend überträgt. Dann überdecken die Küstenlinien dieses Kontinents Nordskandinavien, Nordsibirien und den nördlichen Teil Nordamerikas. Meines Wissens verläuft die sommerliche 0-Grad-Isotherme, die mit einer dauernden Eisbildung einhergeht, auf dem 56. Breitengrad. Der entsprechende auf der Nordhalbkugel verläuft durch Südschottland, Südschweden und Moskau. Jeder interessierte Laie würde bei einer solchen Eisbedeckung auf der Nordhalbkugel von einer Eiszeit sprechen.

Die eiszeitlichen Bedingungen auf der Südhalbkugel beruhen auf der geringeren Sonneneinstrahlung gegenüber der Nordhälfte, verursacht durch die gegenwärtige Konstellation eines der Erdbahnelemente. Vieles spricht deshalb dafür, dass die primäre Ursache der Entstehung von Eiszeiten neben der Meer-Land-Verteilung in der Veränderung der Erdbahnelemente zu sehen ist.

Dr. Eckart Lefringhausen, Meerbusch

Plastik aus Orangenschalen

Spektrogramm, März 2005

Im Artikel wird behauptet, dass bei der Produktion dieses neuartigen Kunststoffs atmosphärisches Kohlendioxid gebunden wird. Diese vereinfachte »Kohlendioxid-Bilanz« vernachlässigt aber, dass bei der industriellen Produktion des Limonens auch Kohlendioxid freigesetzt wird. So benötigen die Zitrusfrüchte zum Wachstum Dünge- und Pflanzenschutzmittel, die unter Emission von Kohlendioxid hergestellt werden. Die Ernte der Früchte und die Gewinnung des ätherischen Öls hieraus erfolgt meist mit Maschinen, die Kohlendioxid emittieren. Eine belastbare Aussage zur Kohlendioxid-Bilanz sollte diese Faktoren berücksichtigen.

Weiterhin wird der neuartige Kunststoff als »ökologisch vorteilhafter Ersatz« für Styropor gepriesen. Dazu sollen wohl die in Ihrem Artikel genannten jährlich weltweit produzierten 50 000 Tonnen Limonen herangezogen werden. Laut den Angaben des Verbands der Kunstofferzeuger werden aber allein in Deutschland jedes Jahr über 600 000 Tonnen an Polystyrol und geschäumtem Polystyrol verbraucht. Wie die übrigen 92 Prozent des deutschen Bedarfs an Styropor gedeckt werden könnten, verschweigt die Meldung ebenso wie die Kosten dieses Austauschs.

Ich halte daher Ihren Artikel nicht für einen sinnvollen Beitrag zur aktuellen Diskussion über nachwachsende Rohstoffe. Eine sachlichere, neutrale Darstellung wäre hier angemessener gewesen.

Dr. Georg Feldmann, Frankfurt

Erratum

An der Schwelle des Bewusstseins, Mai 2005

Anthony Greenwald und seine Kollegen variierten den Zeitabstand zwischen Test- und Zielreiz und wiesen so nach, dass die Priming-Wirkung des ersten nach rund einer Zehntelsekunde – nicht wie fälschlich auf S. 52 geschrieben einer Hundertstelsekunde – abklingt.

Die Redaktion

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Naghib, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 2766
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Jürgen Berger, Dr. Markus Fischer, Dr. Olaf Fritsche, Dr. Corinna Gilley, Dr. Peter John, Dr. Frank Scholz, Claus-Peter Sesin.
Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Julius-Hölder-Str. 47, D-70597 Stuttgart-Degerloch, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2376, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 26 vom 01.01.2005.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/Managing Director, International: Dean Sanderson

SPEKTROGRAMM

PLANETOLOGIE

Saturns Findelkind

■ Von Anfang an fiel Phoebe aus dem Rahmen. Der äußerste Mond von Saturn bewegt und dreht sich entgegengesetzt zu den anderen Trabanten des Ringplaneten. Außerdem ist seine Bahn auffallend exzentrisch und stark gegen die Ekliptik geneigt. Deshalb verdächtigten die Astronomen den Außenseiter schon lange als ehemaligen Streuner, den Saturn erst nachträglich eingefangen hat. Jetzt bestätigten Analysen von Beobachtungsdaten der Raumsonde Cassini diese Vermutung.

So tanzt der Exzentriker nicht nur im Himmelsballett, sondern auch in seiner Zusammensetzung aus der Reihe: Wie Forscher der Nasa und der Universität von Arizona in Tempe anhand der Cassini-Daten feststellten, hat er eine viel höhere Dichte und damit einen größeren Anteil an Silikatgestein als die meisten anderen Saturnmonde. In dieser Hinsicht gleicht Phoebe dem Neptunbegleiter Triton und dem äußersten Planeten Pluto, die nach allgemeiner Ansicht aus der Peripherie des Sonnensystems stammen. Weitere Indizien für die Einwanderungstheorie lieferten Spektren der Oberfläche von Phoebe. Da fanden sich neben eisenhaltigen Mineralien und gebundenem Wasser auch diverse flüchtige Substanzen – darunter gefrorenes Kohlendioxid und organische Moleküle wie Kohlenwasserstoffe und Cyanoverbindungen. Derlei kannte man bisher nur von Kometen und anderen Boten aus dem Kuipergürtel am Rand des Sonnensystems.

Nature, 5.5.2005, S. 66 u. 69

NASA

▲ Pockennarbiger Fremdling: Die Raumsonde Cassini schoss nicht nur dieses Bild vom Saturnmond Phoebe, sondern lieferte auch Hinweise auf seine Herkunft.

MEDIZIN

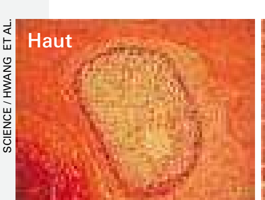
Geklonte Stammzellen von Kranken

■ Woo Suk Hwang machte vor gut einem Jahr Schlagzeilen als Schöpfer der ersten geklonten menschlichen Embryonen. Aus ihnen konnte der Forscher von der Nationaluniversität Seoul (Südkorea) damals eine Stammzelllinie erzeugen – sein eigentliches Ziel. Nun gelang dem Pionier ein weiterer wichtiger Schritt in Richtung praktischer medizinischer Anwendung: Während der übertragene Zellkern seinerzeit von derselben Frau stammte wie die Eizelle, waren die Spender des Erbguts diesmal elf zwei bis 56 Jahre alte Patienten, die an einem unheilbaren Defekt wie Querschnittslähmung, Diabetes Typ vom 1 oder der Immunkrankheit Hypogammaglobulinämie litten. Aus ihrer Haut erzeugte Hwangs Team geklonte embryonale Stammzellen, die im Prinzip geeignet wären, körpereigenes Gewebe des Spenders ohne Abstoßungsreaktion zu ersetzen: In entsprechenden Experimenten konnten sie sich zu den verschiedensten Geweben differenzieren. Therapieversuche machten die südkoreanischen Forscher allerdings nicht, weil zunächst noch viele Fragen zur Sicherheit der Methode zu klären sind.

Bemerkenswert ist auch die drastisch gestiegene Erfolgsquote. Waren vor einem Jahr noch 176 Eizellen für die Produktion einer einzigen Stammzelllinie nötig, so genügten nun 17. Das Team führt dies vor allem darauf zurück, dass frische Eizellen von Spenderinnen unter dreißig Jahren benutzt wurden.

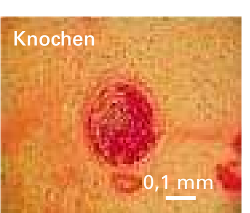
Science, 20.5.2005, S. 1096

SCIENCE / HWANG ET AL.









◀ Aus den geklonten Stammzellen konnten vielerlei Gewebetypen gezüchtet werden.

GEOWISSENSCHAFTEN

Kühle Urerde

Die junge Erde ist viel schneller abgekühlt, als theoretische Modelle der Planetenbildung nahe legen. Das zeigten nun Bruce Watson vom Rensselaer Polytechnic Institute in Troy (New York) und Timothy Harrison von der Australian National University in Canberra. Die beiden Forscher analysierten die ältesten bekannten Minerale: Zirkonkristalle aus Westaustralien, die sich schon rund 200 bis 550 Millionen Jahre nach der Entstehung unseres Planeten gebildet hatten. Ihr Gehalt an dem Fremdelement Titan verrät, bei welcher Temperatur sie einst auskristallisiert sind.

Dieses Thermometer lieferte für die westaustralischen Zirkone nun eine überraschend niedrige Kristallisationstemperatur von 700 Grad Celsius. Demnach entstanden sie unter denselben relativ milden Bedingungen wie heute. Dafür muss die junge Erdoberfläche aber schon recht kühl und feucht gewesen sein. Es dürfte also bereits Ozeane gegeben haben und sogar Kontinente, auf denen der Kreislauf von Verwitterung und Sedimentation ablief. Somit herrschten offenbar auch schon viel früher lebensfreundliche Bedingungen als bisher gedacht. *Science, 6.5.2005, S. 841*

PHYSIK

Archimedes enthüllt

Der Legende nach hatte Archimedes beim Baden die Eingebung zum Auftriebsgesetz, woraufhin er begeistert »Heureka« (»Ich hab's«) rief. Ähnlich erging es wohl auch Uwe Bergmann von der kalifornischen Stanford-Universität, als er erkannte, wie sich bislang unleserliche Abhandlungen des griechischen Mathematikers entziffern lassen. Das Manuskript mit den Texten »Methoden der mechanischen Theoreme« und »Traktat über schwimmende Körper« wurde im 10. Jahrhundert von griechischen Originalen kopiert. Allerdings schrubbte schon 200 Jahre später ein Mönch die 174 wertvollen Ziegenlederseiten mit Bimsstein und Zitronensäure wieder ab und beschrieb sie mit Gebeten.

Bergmann hatte sein Heureka-Erlebnis, als er erfuhr, dass die Tinte, mit der die archimedischen Traktate niedergeschrieben worden waren, Eisen enthielt. Unter diesen Umständen sollte es gelingen, den abgeschabten Text mit Röntgenstrahlung wieder sichtbar zu machen. Während der 287 v. Chr. geborene Archimedes nach seiner Eingebung aus der Badewanne sprang und nackt durch Syrakus rannte, war die spontane Reaktion, zu der Bergmann sich hinreißen ließ, nicht ganz so spektakulär: Er »missbrauchte« die intensive, hochenergetische Synchrotronstrahlung eines Teilchenbeschleunigers, mit der er sonst Photosynthese-Enzyme untersucht, zum Durchleuchten des Palimpsestes. Wie erhofft, wurde der verborgene Text sichtbar – und das sogar auf vier Seiten, die Fälscher im 20. Jahrhundert zusätzlich mit byzantinischen Bildern übermalt hatten. *Stanford Report, 19.5.2005*



STANFORD LINEAR ACCELERATOR CENTER / ROCHESTER INSTITUTE OF TECHNOLOGY / COPYRIGHT BEIM BESITZER DES ARCHIMEDES PALIMPSESTES

Ein Röntgenstrahl brachte eisenhaltige Pigmente in der Tinte des Originaltexts (oben) auf der übermalten Seite (unten) zum Vorschein.



Die fast durchsichtigen Putzergarnelen locken ihre Kunden mit schaukelnden Bewegungen.

JUSTINE BECKER, UNIVERSITY OF QUEENSLAND

BIOLOGIE

Putzservice wirbt mit Tanz

Putzergarnelen tanzen für eine Mahlzeit. Das entdeckten nun Justine Becker und ihre Kollegen an der Universität von Queensland in St. Lucia (Australien). Die kleinen, fast durchsichtigen Krebse leben davon, dass sie vorbeischwimmende Fische von lästigen Parasiten und abgestorbenen Hautschuppen befreien. Allerdings können sie sich ihren viel größeren Kunden wie etwa dem Zackenbarsch nicht einfach nähern, sonst werden sie womöglich gefressen. Vielmehr müssen sie vorher um Erlaubnis nachsuchen und erreichen, dass die Nutznießer ihres Körperpflegeservice auch brav stillhalten.

Um herauszufinden, wie die unauffälligen Dienstleister das anstellen, beobachteten Becker und ihre Kollegen 16 Garnelen-Putzstationen in Riffen vor der Küste Australiens. Wie sich zeigte, vollführten die Krebschen durchweg rhythmische Schaukelbewegungen in der Nähe eines potenziellen Kunden. Waren sie sehr hungrig, tanzten sie besonders eifrig – mit Erfolg: Die umworbenen Riffbewohner verweilten dann öfter und länger bei ihnen als bei satteren Konkurrenten. Die Fische im Riff haben ein schlechtes Sehvermögen und erkennen nur sich bewegende Objekte. Daher müssen die Garnelen, vermuten die Forscher, sogar säuberungswillige Interessenten erst mit ihrem Werbetanz auf sich aufmerksam machen.
Current Biology, 26.4.2005, S. 760


Schuppen und Augen verraten es: Dieses 450 Millionen Jahre alte zahn- und knochenlose Fossil stammt von einem Fisch.

RICHARD J. ALDRIDGE, UNIVERSITY OF LEICESTER

PALÄONTOLOGIE

Früher Fisch

Obwohl zahn- und knochenlos, hinterließ er einen bleibenden Abdruck in südafrikanischem Schiefer: Augen, Schuppen und Leber des Fischs sind auch nach 450 Millionen Jahren noch klar erkennbar. Zwar hat ein Forscherteam um Richard Aldridge von der Universität Leicester (Großbritannien) Teile eines ähnlichen Fossils schon 1994 entdeckt. Die Bedeutung des damaligen Funds erschloss sich den Wissenschaftlern jedoch erst jetzt, als sieben weitere Exemplare zum Vorschein kamen. Die Fossilien veranschaulichen ein sehr frühes Stadium in der Evolution der Fische, als sich die typischen Wirbeltiereigenschaften noch nicht herausgebildet hatten.

Damals herrschte in Südafrika eine Eiszeit. Da die neu entdeckten Fische keine Zähne hatten, waren sie vermutlich keine Räuber, sondern ernährten sich wohl von feinen Schwebteilchen im Schmelzwasser der allmählich zurückweichenden Eisdecken. Detailliertere Informationen sowie ein wissenschaftlicher Name stehen noch aus. Die neuen Fischfossilien sind die ältesten, die je in Afrika entdeckt wurden. Nur zwei versteinerte Fische aus China haben mit 530 Millionen Jahren ein noch höheres Alter. Auch ihnen fehlen Knochen und Kiefer. *Pressemitteilung der Universität Leicester*

ASTRONOMIE

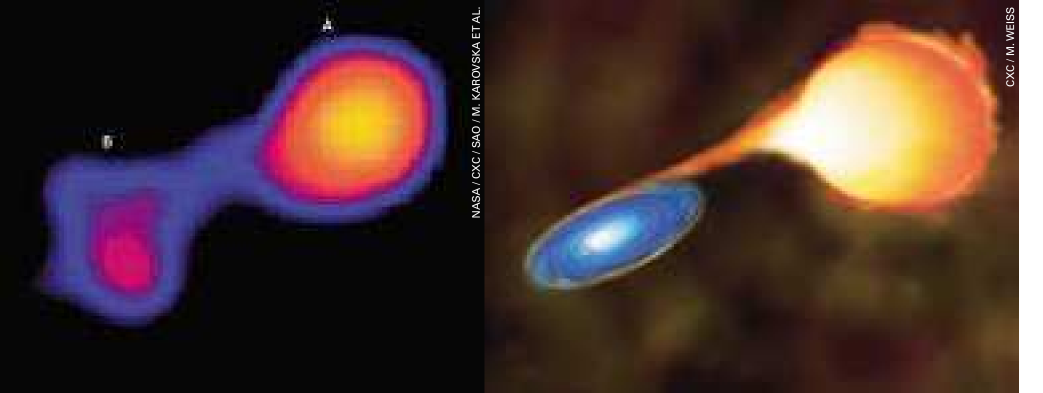
Stellare Fressorgie

Erstmals konnten Wissenschaftler um Margarita Karovska vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics fotografieren, wie in einem Doppelsternsystem einer der Partner Materie vom anderen absaugt. Das Bild stammt vom Röntgenteleskop Chandra und zeigt die beiden nur 420 Lichtjahre von der Erde entfernten Objekte Mira A und B im Sternbild Cetus (Walfisch). Als Roter Riese, der seinen nuklearen Brennstoff fast aufgebraucht hat, wird Mira A bald in sich zusammenstürzen. Dagegen ist Mira B bereits zu einem Weißen Zwerg kollabiert, der etwa die Größe der Erde, aber das 250000-fache ihrer Masse hat.

Auf dem Foto sieht man, was bisher nur theoretisch bekannt oder auf künstlerischen Darstellungen zu betrachten war: Der gefräßige Winzling zieht wie ein Staubsauger Gas von seinem riesigen Nachbarn ab. Das Material bildet eine Brücke zwischen den beiden Sternen und sammelt sich in einer Akkretionsscheibe um Mira B. Während die Teilchen dort in einem gewaltigen Strudel rotieren und auf einer Spiralbahn nach innen stürzen, kollidieren sie immer wieder miteinander und produzieren dabei Röntgenstrahlung. Die detaillierte Aufnahme des Vorgangs ist der exzellenten Winkelauflösung von Chandra zu verdanken – sowie der Tatsache, dass auch Mira A überraschenderweise Strahlungsausbrüche im Röntgenbereich hat.

The Astrophysical Journal, Bd. 623, S. 137

Das Röntgenbild (links) und die künstlerische Darstellung (rechts) zeigen, wie Mira B Materie vom Roten Riesen Mira A absaugt.

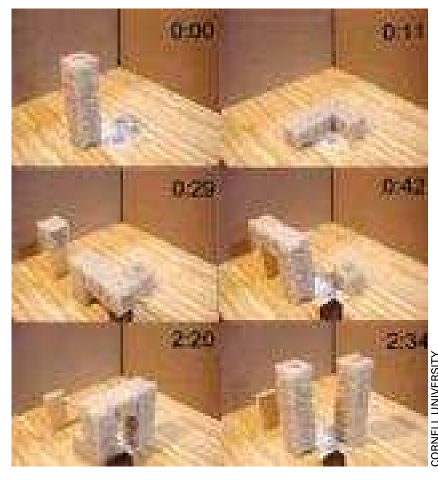


NASA / CXC / SAO / M. KAROVSKA ET AL.; CXC / M. WEISS

TECHNIK

Fortpflanzungsfähiger Roboter

»Seid fruchtbar und mehret euch!« Diesem biblischen Auftrag konnten Roboter bisher nicht nachkommen, brauchten sie für ihre Herstellung doch den Menschen. Ohne Fähigkeit zur Fortpflanzung aber blieb ihnen – mochten Cyberpropheten noch so unken – auch der Weg zur Weltherrschaft versperrt. Nun hat ein Team um Hod Lipson an der Cornell-Universität in Ithaca (New York) einem Maschinenwesen immerhin beigebracht, aus Fertigteilen eine Kopie von sich herzustellen.



CORNELL UNIVERSITY

Der Würfelroboter baut aus fertigen Modulen in knapp drei Minuten eine Kopie seiner selbst.

Der vermehrungsfähige Roboter ist ein Turm aus vier durch Elektromagnete verbundenen Würfeln. Jeder davon besteht aus zwei pyramidalen Hälften, die über ein Drehgelenk zusammenhängen. Die eine enthält einen Motor, die andere die Elektronik mit dem Reproduktionsprogramm. Dieser Aufbau verleiht dem Turm eine schlangenartige Beweglichkeit. Dadurch kann er neue Würfel, die an einer bestimmten Stelle bereitliegen, durch Ein- und Ausschalten der elektromagnetischen Kupplungen ergreifen und zu einem zweiten Turm stapeln.

Von echter Selbstreproduktion ist das Kunststück freilich noch weit entfernt. Der mit Abstand schwierigste Part – neue Würfel zu bauen – bleibt schließlich dem Menschen überlassen.

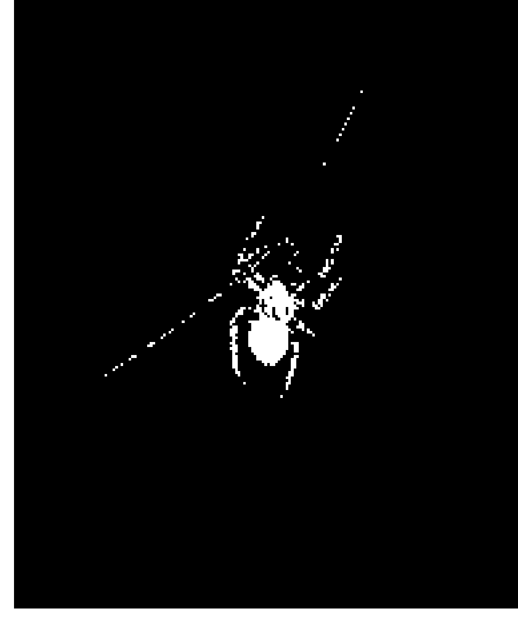
Nature, Bd. 435, S.163, 12.05.2005

Mitarbeit: Eva Hörschgen und Stephanie Hügler

Fruchtbares Monster

Als Geschichte vom Riesenstern, der Generationen neuer Sterne zeugte, könnte man umschreiben, was diese Falschfarben-Infrarotaufnahme des Spitzerteleskops der Nasa zeigt. Die Rede ist von Eta Carinae im Sternbild »Kiel des Schiffs«, einem nur 8000 Lichtjahre entfernten »leuchtkräftigen blauen Veränderlichen«. Mit mehr als hundert Sonnenmassen gehört er zu den stellaren Schwergewichten in der Milchstraße und steht vermutlich kurz vor seiner Explosion als Supernova. Schon seit Langem sendet er intensive Strahlung und einen gewaltigen Sternenwind aus, der durch den umgebenden Carina-Nebel pflügt und daraus »Säulen« aus Staub und Gas modelliert hat. Durch die Kompression des Materials an der Stoßfront sind neue Sterne entstanden, die hier als weiß oder gelb leuchtende Punkte erscheinen. Da der Nebel für sichtbare Strahlung undurchlässig ist, lieferte erst die Infrarotkamera des vor knapp zwei Jahren ins All geschossenen Spitzerteleskops diesen detaillierten Einblick. Gezeigt ist eine 200 Lichtjahre breite Region im Süden von Eta Carinae. Der Monsterstern selbst befindet sich links oben außerhalb des Bilds. In Grün erscheint heißes Gas, während Vordergrundsterne bläulich wirken.

NASA / JPL / SSC / CALTECH / NATHAN SMITH, UNIVERSITY OF COLORADO



BIOTECHNOLOGIE

Spinnenfäden aus der Retorte

Forschern der Technischen Universität München ist es jetzt gelungen, ein faszinierendes Naturprodukt gentechnisch zu erzeugen: Der elastische, stabile Seidenfaden der Spinne lässt sich mit Bakterien nun erstmals in großen Mengen künstlich herstellen.

Von Joachim Eiding

An Zugfestigkeit ist Spinnenseide kaum zu überbieten. Dünner als ein menschliches Haar, halten ihre Fäden selbst extremen Belastungen stand. Dabei sind sie viel elastischer als beispielsweise die Kunstfaser Kevlar. Nur so kann das Spinnennetz zum Beispiel einen Käfer abfangen, der im Flug mit voller Wucht in die Fäden kracht. Spinnenseide hat noch weitere Vorzüge: Leicht und wasserfest, kann sie wie Wolle viel Wasser aufsaugen. Außerdem ist sie biologisch abbaubar.

Schon lange möchten Forscher dieses Supermaterial auch für den Menschen nutzbar machen. Doch bisher scheiterte die großtechnische Produktion. Spinnen selbst sind als Fabrikanten ungeeignet: In Gefangenschaft verlieren sie die Lust, ihre Netze zu weben, und fressen sich lieber gegenseitig auf. Deshalb gibt es seit einigen Jahren bereits Versuche, den wertvollen Stoff von anderen Organismen erzeugen zu lassen, denen die betreffenden Gene übertragen werden.

Das kanadische Unternehmen Nexia Biotechnologies verfiel dazu auf Ziegen und sorgte dafür, dass deren Euterzellen das Spinneneiweiß bilden. Die Ausbeute blieb jedoch zu gering, und die Isolation des Produkts aus der Milch gestaltete sich zu mühsam.

Eine Münchner Forschergruppe um Thomas Scheibel hat deshalb zusammen mit Wissenschaftlern der Hebräischen Universität in Jerusalem ein anderes Ersatztier erprobt: Larven des Eulenfalters *Spodoptera frugiperda*. Allerdings verwendeten die Wissenschaftler nicht die Raupe selbst, die auch als Heerwurm bekannt ist, sondern eine aus ihren Zellen angelegte Kultur. Aus dem Erbgut der Gartenkreuzspinne *(Araneus diadematus)* isolierten sie zunächst die Gene für die Proteine ADF-3 und ADF-4, die als Hauptbestandteile der Fäden gelten. Diese bauten sie dann in ein Baculovirus ein, das Insekten befällt, und beimpften damit die Raupenzellen. Die Übertragung verlief ohne Komplikationen: Die Insektenzellen lasen die fremde Erbinformation problemlos ab und befolgten die darin kodierten Anweisungen.

ALLE FOTOS DIESER DOPPELSEITE: THOMAS SCHEIBEL, TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Raupenzellen des Eulenfalters, denen Forscher die Gene ADF-3 und ADF-4 der Gartenkreuzspinne übertragen hatten, produzierten bis zu 0,5 Millimeter lange Seidenfäden. Dann platzten sie, weil sie die Fäden im Inneren bildeten und nicht ausscheiden konnten. Auf diesen fluoreszenzmikroskopischen Aufnahmen leuchtet das ADF-4-Protein rot.

Die spinnen, die Raupen!

Nach ein bis zwei Tagen begannen die Zellen folglich, die Spinnenproteine zu bilden. Wenig später zeigten sich auch die ersten feinen, kurzen Fäden. Deren Untersuchung per Immunofluoreszenz – eine Methode, bei der sich farbmarkierte Antikörper spezifisch an eine nachzuweisende Substanz anlagern – lieferte allerdings eine Überraschung: Anders als bei der Spinne enthielten die Fäden nur das Protein ADF-4 *(Current Biology, Bd. 14, S. 2070)*.

Das Fehlen von ADF-3 erklärt sich Scheibel mit dessen eher hydrophilem Charakter; deshalb habe es die Tendenz, in der wässrigen Lösung zu verbleiben, während die vorwiegend hydrophoben ADF-4-Moleküle miteinander aggregieren. »Solche Erkenntnisse bringen uns bei der kommerziellen Nutzung und der Entwicklung künstlicher Spinnenseiden einen Schritt weiter«, freut sich sein Kollege Uri Gat von der Hebräischen Universität.

Zwar war die Ausbeute an Spinnenfäden hoch. In einer Hinsicht erfüllte die Raupe die in sie gesetzten Erwartungen allerdings nicht: Wie Untersuchungen mit dem Elektronen- und Rasterkraftmikroskop ergaben, erreichten die Fäden



Die Gartenkreuzspinne (links) produziert komplexe Fäden, wie ein winziger Ausschnitt aus ihrem Netz unter dem Rasterelektronenmikroskop zeigt (rechts). Münchner Forscher übertrugen nun die Gene, welche die Erbinformation für die Herstellung der Seidenfäden tragen, auf Raupen und Bakterien.

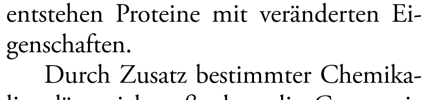
nur eine Länge von 0,1 bis 0,5 Millimetern. Das entspricht dem Durchmesser der Zellen. Diese scheiden den Faden nämlich nicht aus, sondern platzen, wenn er zu lang wird.

Aus diesem Grund entschlossen sich die Münchner Forscher, zu einem noch primitiveren Organismus überzugehen: dem Darmbakterium *Escherichia coli*. Das brachte allerdings ein zusätzliches Problem mit sich: Gene von höheren Organismen, zu denen in diesem Zusammenhang auch die Spinnen zählen, lassen sich zwar in die Mikrobe einschleusen, werden von dieser aber schlichtweg ignoriert. Der Grund: *E. coli* benutzt einen leicht veränderten Triplett-Code zur Entschlüsselung der Erbinformation; zudem wird der Ablesevorgang der Gene anders gesteuert.

Daher mussten die Münchner Chemiker die ADF-3- und ADF-4-Gene der Spinne mit Hilfe eines DNA-Synthesizers – einer Art Synthese-Maschine für Erbgut – in Varianten übersetzen, die das Bakterium versteht. Diese Kunstprodukte vervielfältigten sie dann und setzten sie in *E. coli* ein.

Der mühevolle Umweg lohnte sich: Die genmanipulierten Bakterien lieferten einen Eiweißbrei, der sich bei Zusatz eines mittlerweile patentierten Gemischs aus organischen und anorganischen Stoffen nach kurzer Zeit in eine Art Klumpen verwandelte; und daraus ließ sich ein Faden ziehen, dessen Länge praktisch unbegrenzt ist. Die Ausbeute hing nur von der eingesetzten Menge an Bakterien ab. So benötigen die Wissenschaftler für ein Kilogramm Seide etwa tausend Liter *E. coli*-Suspension – was laut Scheibel kein Problem darstellt.

Mit dem neuen Verfahren gelingt es also erstmals, Spinnenfäden in beliebiger Menge künstlich zu erzeugen – aber nicht nur das: Man kann sie auch gezielt abwandeln, also für bestimmte Einsatzzwecke maßschneidern. So lassen sich Bruchstücke der Seidengene fast beliebig miteinander kombinieren. Auf diese Art entstehen Proteine mit veränderten Eigenschaften.

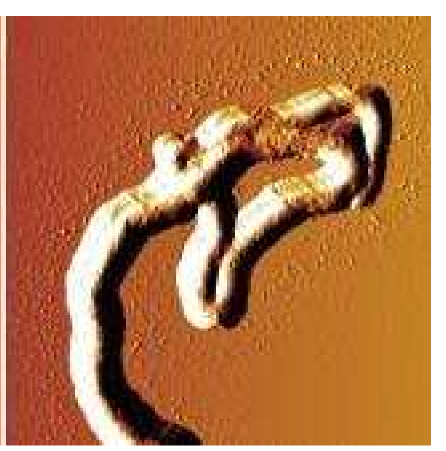


Durch Zusatz bestimmter Chemikalien lässt sich außerdem die Geometrie der Fäden beeinflussen, sodass ihr Durchmesser beispielsweise statt einem Mikrometer nur noch drei bis fünf Nanometer beträgt. Scheibel sieht in diesen extrem dünnen Fasern eine biologisch abbaubare Alternative zu den viel gepriesenen Nanoröhrchen (»Nanotubes«) aus Kohlenstoff.

Stefan Schulz von der Technischen Universität Braunschweig bestätigt: »Grundsätzlich ist eine Anwendung der Spinnenfäden in der Nanotechnologie durchaus denkbar.« Dagegen gibt sich der Mikroprozessorhersteller Intel noch reserviert. »Die Fadendicke ist für Anwendungen in der Halbleitertechnik viel zu groß«, meint Firmensprecher Christian Anderka. »Auch die Kompatibilität mit unseren Herstellungsprozessen müsste erst noch geklärt werden.«

Vorsorglich haben die Münchner Forscher beide Verfahren – das mit dem Heerwurm und das mit dem Bakterium – als Patent angemeldet. Unterstützt wurden sie dabei vom Erfinderbüro der Technischen Universität München und der Hochschulpatentinitiative Bayern.

Inzwischen fand Thomas Scheibel für seine Arbeit bereits wissenschaftliche Anerkennung: Auf der Werkstoffwoche erhielt er im vergangenen September beim Junior Scientist Award den ersten Preis. Auch ein industrieller Erfolg zeichnet sich ab – mehrere Unternehmen haben schon Interesse an den Seidenfäden aus München angemeldet.



Genetisch manipulierte Bakterien produzierten die nur zwei Mikrometer dicke künstliche Spinnenseide, die auf dieser Rasterkraftmikroskop-Aufnahme zu sehen ist – links als Höhen- und rechts als Reibungsprofilbild.

Joachim Eiding ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in München.

ROBOTIK

Wettkampf der mechanischen Retter

In der Rescue League der Robocup German Open rollten, liefen und kletterten Roboter durch ein künstliches Erdbebengebiet. Mit Kameras, Infrarotsensoren, Mikrofonen und Gasdetektoren suchten sie nach »Katastrophenopfern«. Aus dem Spiel soll bald Ernst werden.

Von Bettina Bläsing

Unter herabgestürzten schweren Holzbalken ragt eine menschliche Hand hervor. Nur zwei Finger zucken leicht – das einzige Signal, das verrät, dass noch Leben in dem Opfer ist. Doch Hilfe ist bereits auf dem Weg: Ein Rettungsroboter nähert sich der Unfallstelle und erfasst mit seiner Kamera die Bewegung der Finger. Nachdem er den optischen Reiz erkannt, richtig gedeutet und lokalisiert hat, sendet er die Ortsdaten an ein Rettungsteam, das den Verletzten in kurzer Zeit birgt.

So könnte der erfolgreiche Einsatz eines Rettungsroboters in einem Katastrophengebiet im Ernstfall aussehen. Glücklicherweise ist das hier nicht der Ernstfall. Der Arm im karierten Hemdsärmel besteht aus Plastik, und die Holzbalken, unter denen er hervorragt, gehören zu einem künstlichen Erdbeben-Szenario. Wir befinden uns in der Rescue League der Robocup German Open im Heinz Nixdorf MuseumsForum in Paderborn. Während das Fußballturnier der Roboter Anfang April dieses Jahres schon zum fünften Mal stattfand, waren die Rettungsroboter erstmals dabei.

Auf Rädern, Ketten oder Laufbeinen durchqueren die Maschinenwesen Labyrinthe aus Holzpaletten, Pappkartons und Plastikfolien – immer auf der Suche nach künstlichen Katastrophenopfern. Die Auswahl ist groß, neben zuckenden Fingern gibt es winkende Hände, zappelnde Beine, einen Schlauch, aus dem Kohlendioxid strömt, eine Wärmequelle, einen Pieper und eine schreiende Babypuppe. Entsprechend vielfältig sind die »Sinnesorgane« der Retter. Ihre Kameras sehen Bewegungen, Mikrofone hören Hilferufe, Infrarotkameras erspüren Körperwärme und Kohlendioxid-Detektoren riechen den simulierten Atem der Opfer.

Kampf mit Rampen und Stufen

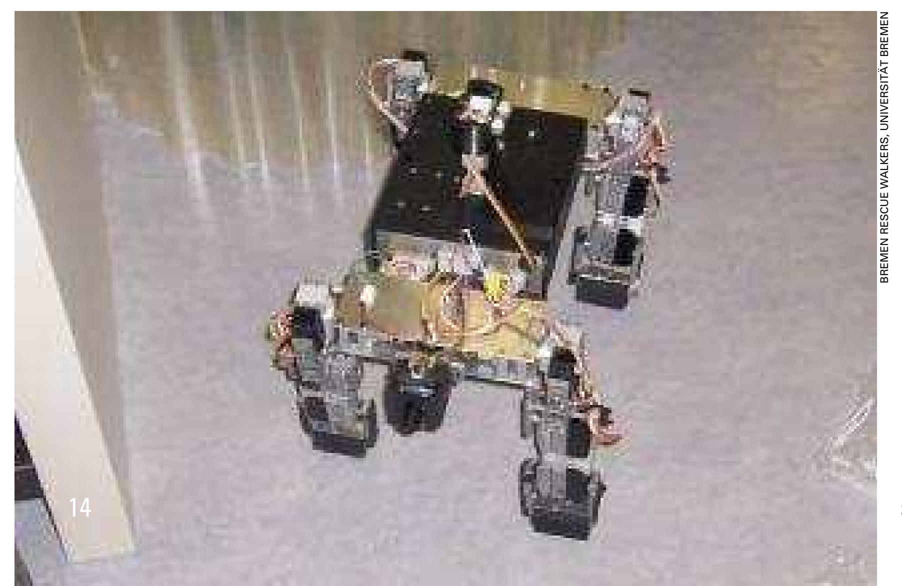
Es gibt drei Szenarien unterschiedlicher Schwierigkeitsgrade, die durch Farben gekennzeichnet sind. Die geringsten Ansprüche stellt die gelbe Arena. Hier müssen die maschinellen Spürhunde keine Hindernisse überwinden, um die Opfer zu entdecken. Damit es nicht zu einfach wird, sind in dieser Arena seit dem Wettkampf in Paderborn nur noch autonome Rettungsroboter zugelassen, die alle Entscheidungen selbstständig treffen. Die menschlichen Betreuer können die Aktionen ihrer Schützlinge zwar am Monitor beobachten, aber nicht eingreifen.

In der orangefarbenen und der roten Arena dagegen, in welcher der Weg zu den Opfern mit Hindernissen gepflastert ist und über Rampen und Stufen führt, gibt es einen »Steuermann«, der den Roboter leitet. Hinter einer Wand verfolgt er auf Monitoren die Kamerabilder, inneren Parameter und sensorischen Messdaten des Katastrophenhelfers in der Arena. Dabei sieht er die Welt aus dessen Perspektive und entscheidet nur auf Grund der erhaltenen Informationen, welche Aktionen der mechanische Retter ausführen soll. Somit übernimmt er gewissermaßen die Rolle eines Gehirns, das sensorische Daten empfängt und in motorische Handlungsanweisungen umsetzt.

Während der Kandidat des Teams SPQR Real Rescue aus Rom sich seinen Weg durch die gelbe Arena sucht, lehnt Adam Jacoff an der Bande und mustert ihn mit kritischem Blick. Für jedes lokalisierte Opfer notiert er fünfzig Punkte. Das Berühren von Gegenständen ist erlaubt, für heftigeres Anstoßen gibt es fünf Punkte Abzug. Das Beschädigen oder Verschieben von Teilen des Arrangements wird mit zwanzig Strafpunkten geahndet. Das gilt auch, wenn von der Ungeschicklichkeit das Opfer selbst betroffen ist – eine recht nachsichtige Wertung, denkt man an ein reales Szenario.

Jacoff spielt nicht nur den Schiedsrichter. Der Ingenieur vom National Institute of Standards and Technology (NIST) in Maryland ist einer der Väter der Rescue League und gestaltet weltweit Testszenarien für Rettungsroboter. Auch an der International University Bremen hat er bereits eine Arena nach dem NIST-Standard eingerichtet.

Die Idee, die Testläufe der Rettungsroboter zum sportlichen Wettkampf zu erklären, hatte Jacoff schon vor Jahren. Die Geburtsstunde der Rescue League schlug bei seiner Begegnung mit Satoshi Tadokoro, Professor für technische Informatik an der Universität Kobe (Japan) und Leiter des International Rescue System Institute (IRS). Es war 2002 gegründet worden – im Rahmen einer Ini- ▷



BREMEN RESCUE WALKERS, UNIVERSITÄT BREMEN

◁ Der vierbeinige »Aimee« war der einzige Laufroboter bei der Rescue League der Robocup German Open, die Anfang April im Heinz Nixdorf MuseumsForum in Paderborn stattfand. Er meisterte zwar das Stufenbrett mit Bravur, verhedderte sich dabei aber hoffnungslos in einem Kabel.

tiative zur Entwicklung von Robotertechnologien für den Einsatz im Katastrophenschutz. Den Anstoß dazu gab das verheerende Erdbeben, das im Januar 1995 große Teile der Stadt Kobe zerstört und über 5000 Menschenleben gefordert hatte – bei mehr als 400 000 Verletzten. Die Wissenschaftler hoffen, dass Rettungsroboter ein solches Erdbebengebiet dereinst wesentlich schneller und effektiver absuchen können, sodass sich die Überlebenschancen der Opfer um ein Vielfaches erhöhen.

Die Mitarbeiter des Mechatronics Research Lab der Universität Qazvin (Iran) haben ihren Roboter »Naji-I« zu Hause schon im Gelände nach einem echten Erdbeben getestet, allerdings ohne Rettungseinsatz. Drei Teams der Rescue League kommen aus dem Iran, je eines aus Frankreich und Italien und vier aus Deutschland.

Einsamer Läufer in der Arena

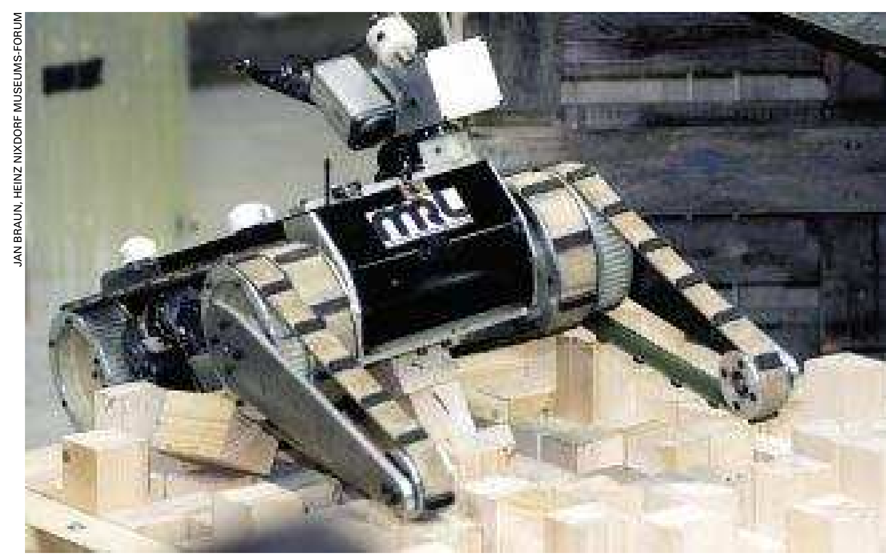
Gerade versucht »Aimee«, der vierbeinige Roboter der Rescue Walkers von der Universität Bremen, staksend die Stufen am Eingang der roten Arena zu erklimmen. Er ist das Produkt eines Studentenprojekts und die einzige Laufmaschine im Feld; alle Konkurrenten fahren auf Rädern oder Ketten durch die Arena. Pionier Jacoff zeigt sich beeindruckt: »In einer Umgebung mit großen Unebenheiten braucht man Beine«, sagt er, »Räder nutzen wenig, wenn man Stufen und unregelmäßige Hindernisse überwinden muss.« Beim Stufenbrett hat Aimee denn auch die Nase vorn. Mit nebeneinander aufragenden Blöcken unterschiedlicher Höhe ist es für einen Roboter auf Rädern fast unüberwindlich und selbst für eine Laufmaschine eine Herausforderung. Dabei muss jeder Schritt höher oder tiefer angesetzt werden als der vorige.

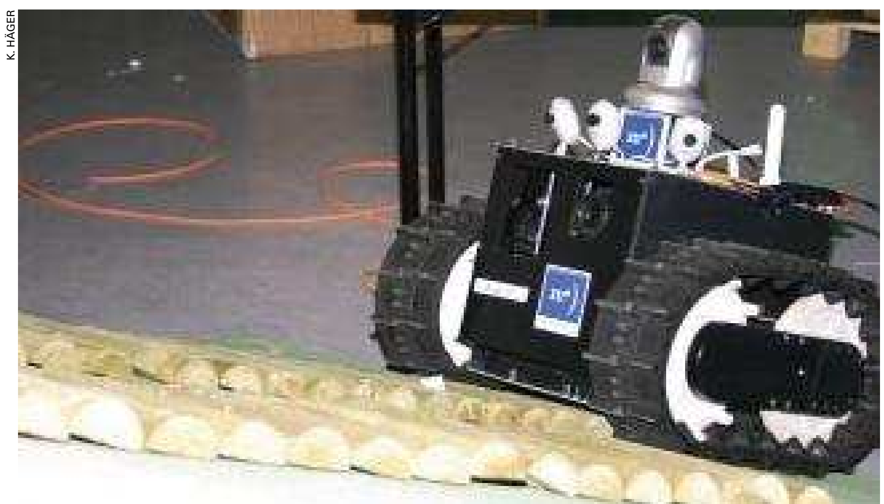
Nicht ganz so anspruchsvoll ist die Treppe. Der »Lurker« von den Rescue Robots der Universität Freiburg meistert sie mit einer recht originellen Methode: Auf vier ovalen, mit Ketten bespannten Gliedmaßen stemmt er seinen Körper auf Höhe der ersten Stufe und zieht sich dann auf seinen Ketten schräg über die Stufenkanten nach oben. Spontaner Beifall brandet auf.

»Hier im Wettbewerb denkt natürlich jeder an seinen eigenen Erfolg«, sagt Jacoff. »Die Teams betrachten sich als Konkurrenten und sind sehr ehrgeizig. Aber für mich ziehen doch alle am gleichen Strang. Sie entwickeln gemeinsam Lösungen für dieselben Probleme. Jedes Team setzt dabei eigene Schwerpunkte und konzentriert sich auf andere Teilaufgaben. Dieser Roboter hier ist zum Beispiel darauf spezialisiert, eine Karte von seiner Umgebung zu erstellen.«

Kurt3D, der Wettbewerbsteilnehmer des Fraunhofer Instituts für Intelligente Autonome Systeme (AIS) in St. Augustin, trägt einen 3-D-Laserscanner, mit dem er seine Umgebung abtastet. »Aus den Daten, die der Scanner ihm liefert, berechnet er in Realzeit, wie seine Umgebung aussieht«, erklärt Kai Pervölz vom Team Deutschland1 des AIS. »So kann er sich besser orientieren, Hindernisse vermeiden und Opfer lokalisieren.« Der Orientierungsvorteil zahlt sich aus: Kurt3D bekommt die beste Wertung unter den autonomen Robotern.

Sieger im Rettungswettbewerb der German Open wird dagegen das Team des Qazvin Mechatronics Research Lab: Mit seinen robust gebauten Naji-Robotern erreicht es die höchste Gesamtpunktzahl. Die Iraner blicken nun mit Optimismus nach Osaka, wo vom 13. bis 19. Juli die Internationale Weltmeisterschaft im Robocup stattfinden wird. Bis dahin bleiben den Konstrukteuren noch ein paar Wochen Zeit, um Sensorik, Stabilität und Suchstrategien ihrer Rettungsroboter zu optimieren, damit diese für den erneuten Einsatz im simulierten Ernstfall noch besser gerüstet sind.


JAN BRAUN, HEINZ NIXDORF MUSEUMS-FORUM


K. HÄGER

Mühsam bewältigt Roboter »Naji-II« vom Team des Mechatronics Research Laboratory der Universität Qazvin (Iran) das Stufenbrett (oben). Die einfachere Rampe ist für den Rugbot1 der Rescue Robots von der International University Bremen dagegen kein Problem.

Bettina Bläsing ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin mit speziellem Interesse an Robotern und maschineller Intelligenz.

MEDIZIN

Der Alltag eines Brustkrebsgens

Vor rund zehn Jahren entdeckten Forscher zwei Erbfaktoren, deren Mutation das Brustkrebsrisiko deutlich erhöht. Erst jetzt ließ sich die normale Funktion eines dieser Gene klären.

Von Michael Groß

Schon früh zeigte sich, dass Brustkrebs in bestimmten Familien gehäuft auftritt. Mitte der 1990er Jahre schließlich gelang es, zwei Gene namens BRCA1 und 2 zu identifizieren, die mit der erblichen Disposition für ein Mammakarzinom zusammenhängen. Diese Entdeckung galt als Meilenstein in der Tumorforschung.

Alleine in Deutschland, so stellte sich bald heraus, sind erbliche Mutationen in einem der beiden Gene für 800 Brustkrebsfälle pro Jahr verantwortlich. Nach Schätzungen aus den USA kann das Erkrankungsrisiko durch eine solche Mutation drastisch steigen: von 13,2 auf bis zu 85 Prozent. Außerdem tritt der Krebs in diesem Fall oft schon vor den Wechseljahren auf, während er sich sonst meist erst danach manifestiert. Auch bei anderen Organen und bei Männern begünstigt das mutierte Gen bösartige Wucherungen; allerdings steigen die Risiken weniger dramatisch.

Bei Familien, die durch häufige, frühe Brustkrebserkrankungen auffallen, kann man die BRCA-Gene eines betroffenen Mitglieds sequenzieren und so pathologische Veränderungen aufspüren. Diese Prozedur ist recht aufwändig; haben die Ärzte die Mutation aber erst einmal gefunden, können sie durch einfache Gentests ermitteln, welche weiteren Familienmitglieder Träger der Veranlagung sind.

Die Erkenntnis nutzt den Betroffenen freilich nicht sehr viel. Ihnen bleibt lediglich erhöhte Wachsamkeit; denn eine Präventions- oder Heilmethode hat sich aus der Kenntnis dieser Gene noch nicht ergeben. Das liegt vor allem daran, dass man bisher nicht wusste, welche Rolle die darin codierten Proteine im gesunden Organismus spielen. Beim BRCA2 haben US-Forscher diese Wissenslücke nun geschlossen *(Nature, 10. 2. 2005, S. 653)*.

Wenn beide Stränge reißen

Dabei konnten sie auf frühere Untersuchungsergebnisse zurückgreifen, die den Wirkort von BRCA2 schon eingekreist hatten. Demnach schien das Proteinprodukt dieses Gens eine wichtige Rolle bei der Reparatur bestimmter Schäden am Erbgut zu spielen. Genauer gesagt, handelt es sich um Doppelstrangbrüche, bei denen gleich beide Fäden der DNA-Doppelhelix reißen, wodurch das betreffende Chromosom in zwei Teilstücke zerfällt. Dieser gravierende Defekt lässt sich nur mit einem komplizierten Mechanismus beheben (siehe dazu den Kasten auf S. 20).

Zunächst erzeugt das Reparatursystem dabei an jedem Bruchstück ein so genanntes Filament aus einzelsträngiger Erbsubstanz, auf dem wie auf einer Perlenkette viele Moleküle des Proteins Rad51 aufgereiht werden. Die älteren Untersuchungen hatten bereits ergeben, dass das BRCA2-Protein am Anbringen dieser »Perlen« beteiligt sein sollte. Es verfügt nämlich, wie Röntgenstrukturanalysen zeigten, über Bindungsstellen für Rad51 und DNA. Weil das komplette Protein wegen seiner Größe nicht gentechnisch herstellbar ist, ließ sich allerdings jeweils nur von Teilstücken die räumliche Gestalt ermitteln.

So plausibel die Vermutung schien, dass BRCA2 beim Anbringen der Rad51-Moleküle hilft – experimentelle Tests lieferten nicht die erhoffte Bestätigung, sondern hatten widersprüchliche Ergebnisse. Auch hier konnten freilich nur Teilstücke eingesetzt werden. Manche von ihnen schienen zwar die Bildung der Perlenketten aus Rad51 und DNA zu fördern, andere den Vorgang aber eher zu behindern.

Nikola Pavletich und ihre Mitarbeiter am Memorial Sloan-Kettering Cancer Center in New York umgingen diese Sackgasse nun, indem sie mit einem analogen Gen in einem primitiveren Organismus arbeiteten. Tatsächlich stellt der Pilz *Ustilago maydis* ein Pendant des BRCA2-Proteins namens Brh2 her, das ▷

In der Skulptur »Die Nacht« hat Michelangelo den Busen seines Modells so naturgetreu nachgebildet, dass heutige Mediziner Anzeichen für fortgeschrittenen Brustkrebs daran erkennen können.

▷ sich leichter handhaben lässt. Andere Forscher hatten zuvor schon herausgefunden, dass es ebenso wie BRCA2 für die Reparatur von Doppelstrangbrüchen notwendig ist.

Um seine genaue Funktion zu prüfen, konstruierten die US-Forscher einen Ring aus einzelsträngiger DNA, der nur auf einem kurzen Abschnitt mit einem passenden Gegenstrang gepaart war. In der Tat beschleunigte sich das Aufreihen der Rad51-Perlen auf diesem DNA-Halsband in Gegenwart von Brh2. Am schnellsten lief der Vorgang ab, wenn das Protein genau am Übergang zwischen Doppel- und Einzelstrang saß. Auch den nachfolgenden Schritt der Chromosomenreparatur, bei dem der mit Rad51 gesäumte Einzelstrang mit einem intakten Doppelstrang einen Partnertausch ausführt (siehe Kasten), konnten die New Yorker mit ihrem Modellring nachvollziehen *(Nature, Bd. 433, S. 653)*.

Die neuen Befunde liefern auch eine Erklärung für die widersprüchlichen früheren Ergebnisse. BRCA2-Fragmente, die nur die Rad51-Bindungsstelle enthielten, blockierten dieses Protein, ohne es mit der DNA verkuppeln zu können. Bruchstücke dagegen, die DNA, aber nicht Rad51 erkannten, behinderten die Ausbildung der Perlenkette zwar nicht, konnten sie aber auch nicht nennenswert beschleunigen.

Achillesferse von Tumorzellen

Damit scheint jetzt gesichert, dass die primäre Funktion des BRCA2-Proteins darin besteht, bei Doppelstrangbrüchen für die rasche Aufreihung der Rad51-Proteine an der Einzelstrang-DNA zu sorgen. Ohne diese Hilfestellung bleiben die Chromosomenbruchstücke getrennt, was die Stabilität des Genoms gefährdet und bei den nächsten Zellteilungen schwer wiegende Folgen haben kann. Doch wie führt dieses Versagen des Reparaturapparats ausgerechnet zu Brustkrebs? Und wie hängt es mit den anderen Faktoren zusammen, die offenbar auch zu Entstehung, Verlauf, und Schwere der Erkrankung beitragen?

Solche Fragen lassen sich in Zukunft vielleicht mit Hilfe von Mäusen beantworten. Die Arbeitsgruppe von Michael Bishop an der Universität von Kalifornien in San Francisco hat nämlich ein Verfahren entwickelt, Krebsgene direkt in das Brustgewebe des Nagers einzuschleusen. Als trojanisches Pferd dient dabei ein so genanntes Retrovirus, das seine Erbinformation als RNA speichert und in der infizierten Zelle dann in DNA umschreibt.

Die Kalifornier befassten sich allerdings nicht mit BRCA2, sondern untersuchten ein Protein namens Met, das in stark metastasierenden Tumoren oft im Übermaß hergestellt wird. Mit dem Mausmodell fanden sie heraus, dass dieses Protein für sich allein noch keinen Brustkrebs auslöst, sondern einen Helfer namens Myc braucht, der auch in großen Mengen vorhanden sein muss *(Proceedings of the National Academy of Sciences, 22.3.2005, S. 4324)*. ▷

Reparatur von Doppelstrangbrüchen

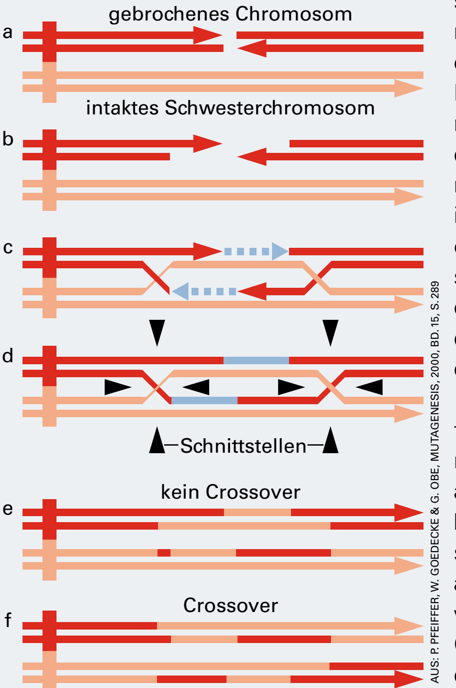
Sind beide Fäden der DNA-Doppelhelix gerissen, spricht man von einem Doppelstrangbruch. Er zerlegt das betroffene Chromosom in zwei Fragmente (a). Da unklar ist, wie viel Erbmaterial an der Bruchstelle verloren gegangen ist, klebt das Reparatursystem der Zelle die losen Enden gewöhnlich nicht einfach wieder zusammen. Es nutzt vielmehr die Tatsache, dass von jedem Chromosom zwei Exemplare vorhanden sind. Folglich lagert es die beiden Bruchstücke mit dem beschädigten Ende an den entsprechenden Abschnitt des Schwesterchromosoms an, sodass von diesem die korrekte Basenfolge abgelesen werden kann. Verloren gegangene Abschnitte lassen sich so ergänzen.

Im Einzelnen ist dieser Vorgang sehr kompliziert. Paradoxerweise vergrößert das Reparatursystem den Schaden sogar – scheinbar – erst einmal noch, indem es in beiden Chromosomenfragmenten an der Bruchstelle einen der zwei DNA-Stränge zurückstutzt, wodurch der andere überhängt (b).

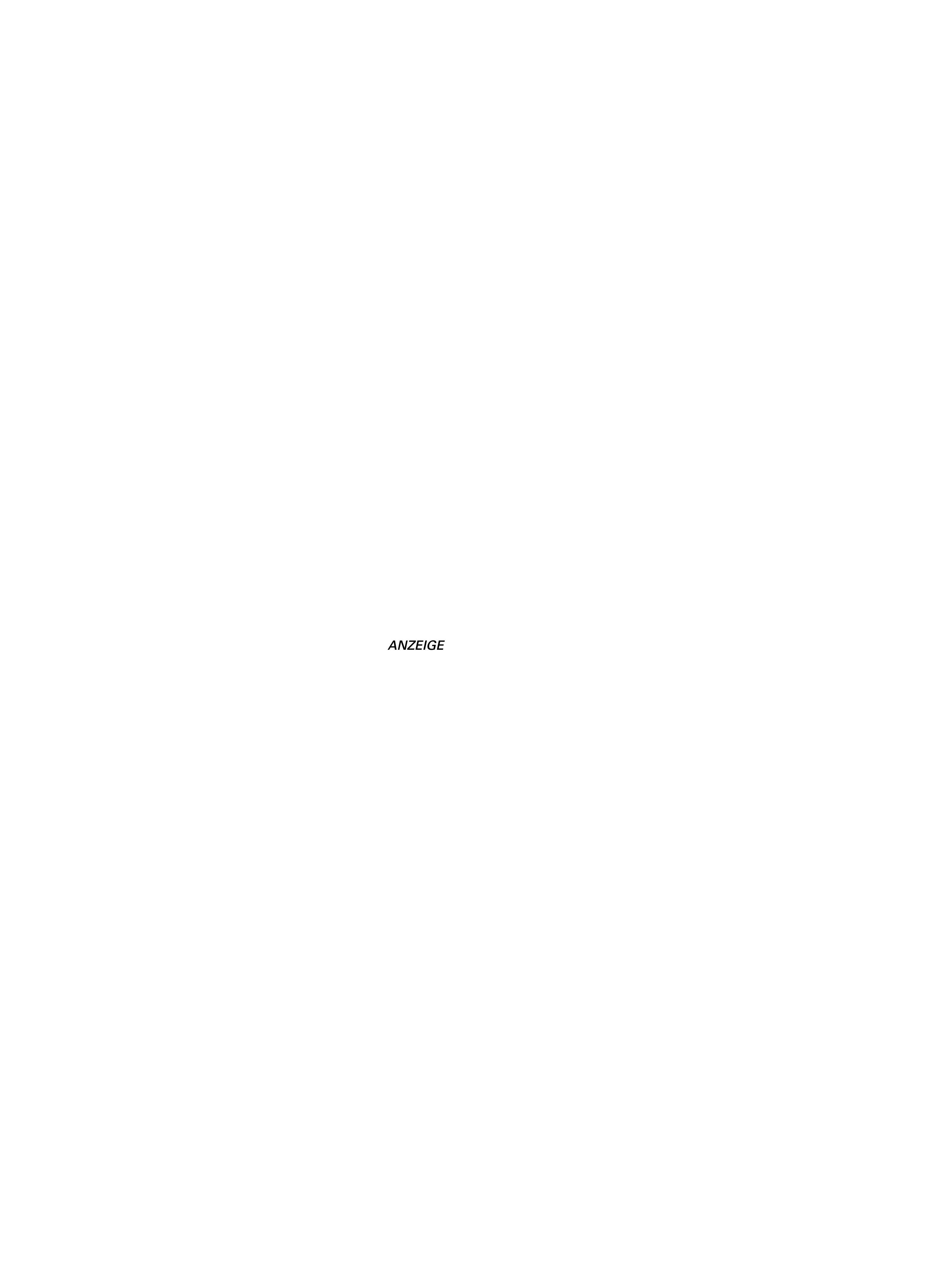
An das Ende des überhängenden Strangs heftet sich ein Protein namens Rad52 und schützt ihn so vor abbauwütigen Enzymen. Dann tritt das Eiweißprodukt des BRCA2-Gens auf den Plan und übt seine jetzt aufgeklärte Funktion aus. Sie besteht darin, den überhängenden Faden mit Rad51-Molekülen zu bestücken, bis er wie eine Perlenkette aussieht. Mit Hilfe der Rad51-Noppen können sich die einzelsträngigen Enden der beiden Chromosomenfragmente in den intakten Doppelstrang des Schwesterchromosoms einklinken. Dabei entsteht eine so genannte Holliday-Junction: ein Bereich, in dem die beiden Doppelhelices (die gebrochene und die intakte) über eine gewisse Strecke einen Partnertausch ausführen (c).

Man kann sich den Vorgang so vorstellen, dass sich die zwei Stränge des intakten Chromosoms an dem fraglichen Abschnitt voneinander lösen und jeweils mit dem passenden überhängenden Faden der zerrissenen DNA verbinden. Die Doppelhelix erweitert sich also zu einem gemischten Vierer. Darin ist jedes der Fragmente aus der defekten DNA mit dem entsprechenden Abschnitt des intakten Chromosoms gepaart, sodass es anhand der dort vorhandenen Basenfolge vervollständigt und dann mit dem Ende des zugehörigen Strangs auf dem anderen Fragment verbunden werden kann (d).

Im letzten Schritt löst sich das verknotete Quartett schließlich wieder in zwei normale Doppelhelices auf. Das kann auf zwei Arten geschehen. Im einen Fall behalten die Chromosomen ihre ursprüngliche Identität mit ein paar Flicken an der Bruchstelle (e), im anderen Fall werden die Stranghälften zwischen den Chromosomen überkreuz verknüpft und damit ausgetauscht (Crossover; f).



AUS: P. PFEIFFER, W. GOEDECKE & G. OBE, MUTAGENESIS, 2000, BD. 15, S. 289



▷ Damit ist ein weiteres Steinchen im Mosaik der Entstehung des Mammakarzinoms geklärt. Es steht allerdings zu befürchten, dass noch Dutzende von anderen Genen und Proteinen sowie deren Wechselwirkungen zu ergründen sind, bevor das ganze Netzwerk einer so komplexen Krankheit entwirrt werden kann.

Selbst mit Teileinsichten lassen sich jedoch möglicherweise schon erfolgreiche Therapien entwickeln. Die Zellen eines Mammakarzinoms, das durch Mutation in BRCA2 ausgelöst wurde, besitzen alle dieselbe Achillesferse: Sie können keine Doppelstrangbrüche reparieren.

Zwei britische Forschergruppen haben nun unabhängig voneinander mit Hilfe von Zellkulturen einen Weg gefunden, diese Schwäche zu nutzen, um den Tumor abzutöten. Sowohl Thomas Helleday an der Universität Sheffield als auch Alan Ashworth vom Institute of Cancer Research in London entwickelten Hemmstoffe gegen ein Reparatur-Enzym namens Parp (Poly-ADP-Ribose-Polymerase).

Dieses ist an der Reparatur von Einzelstrangbrüchen beteiligt, die häufiger auftreten und leichter zu beheben sind als Doppelstrangbrüche. Die britischen Teams fanden jedoch übereinstimmend eine überraschende und bisher ungeklärte Querverbindung zwischen beiden Reparaturmechanismen. Wie sie feststellten, töten Parp-Hemmer selektiv Zellen mit defektem BRCA2 ab. Auf Krebspatientinnen übertragen bedeutet dies, dass der Hemmstoff für die gesunden Körperzellen harmlos ist und gezielt nur die bösartigen angreift *(Nature, 14.4.2005, S. 913 u. 917).*

Michael Groß ist promovierter Biochemiker, freier Wissenschaftsjournalist und »Science Writer in Residence« am Birkbeck College in London.

NACHGEHAKT

Therapeutisches Klonen – die falsche Vision?

Die Weltkarte der Klon- und Stammzellforschung ist ein bunter Flickenteppich. In Großbritannien, Israel und Südkorea sind Experimente erlaubt, für die es in den USA keine Staatsgelder und in Deutschland sogar Gefängnisstrafen geben würde. Ende Mai wurde diese paradoxe Situation wieder einmal deutlich, als koreanische Forscher einen weiteren Schritt in Richtung zum therapeutischen Klonen vermeldeten (siehe Spektrogramm, S. 8). In Washington drohte George W. Bush dem Repräsentantenhaus, das solche Versuche in den USA befürwortete, mit seinem Veto, während Schröders klonfreundliche Ministerinnenriege (Bulmahn, Schmidt, Zypries) allenfalls im Stillen auf eine Zeitenwende hoffen konnte.

In den meisten Ländern hinkt die Politik in Sachen Gentechnologie und Reproduktionsmedizin der Forschung hoffnungslos hinterher und versagt deshalb bei der Aufgabe, sinnvolle Grenzen zu setzen oder Richtungen vorzugeben. Während zum Beispiel über die Ethik des therapeutischen Klonens gebetsmühlenartig die altbekannten Argumente ausgetauscht werden, fragt niemand, ob die Vision, jedem Patienten mit einem Zelldefekt oder Organausfall über einen persönlichen Klon maßgeschneiderten Ersatz zu verschaffen, überhaupt realistisch ist.

Den Koreanern geht es derzeit darum, die prinzipielle Machbarkeit zu demonstrieren. Doch sobald Hunderttausende von Patienten mit Diabetes oder Parkinson-Krankheit vor ihrer Tür stehen, werden auch sie zugeben müssen, dass sie diese allein aus Kostengründen nicht therapieren können, selbst wenn sie der Verbrauch gespendeter Eizellen und geklonter Embryonen im großtechnischen Maßstab nicht erschreckt.

In Großbritannien, wo dieselbe Technik über Einzelfallgenehmigungen einer Regierungsbehörde zulässig ist, hat man weniger spektakuläre, aber realistischere Pläne mit dem Klonen und der Zelltherapie. Hier wollen Forscher die geklonten Embryonen nicht direkt zur Behandlung eines Einzelpatienten verwenden, sondern dazu, ein Modellsystem der betreffenden Krankheit zu entwickeln, an dem sich dann andere Therapieformen testen lassen. Die Arbeitsgruppe in Newcastle, die kürzlich die ersten in Europa erzeugten menschlichen Klone präsentierte, hat dabei zum Beispiel den Diabetes im Visier.

Das Edinburgher Roslin-Institut, wo das Klonschaf Dolly erzeugt wurde, will Stammzellen mit den Genen der Muskeldystrophie erzeugen (der Krankheit, mit welcher der Physiker Stephen Hawking seit Jahrzehnten kämpft, obwohl ihr die meisten Betroffenen innerhalb von zwei Jahren erliegen). Am Londoner King's College interessiert man sich für die Mukoviszidose, eine auf den Britischen Inseln relativ häufige Erbkrankheit.

Der teuren Vision, für jeden Patienten eine persönliche Stammzellkultur zu erzeugen, hat man auch in Oxford längst abgeschworen. Stattdessen ist es dortigen Forschern – zunächst im Tierversuch – gelungen, Transplantate aus einer Stammzellkultur für viele verschiedene Empfänger verträglich zu machen. Der Trick: Die Wissenschaftler gewannen aus den Stammzellen nicht nur die für die Therapie gewünschten Organ-, sondern zusätzlich eine bestimmte Art von Immunzellen (Dendrozyten), die dem Transplantat quasi als Eintrittskarte in den Körper des Empfängers dienen und dafür sorgen, dass das Immunsystem den Fremdkörper akzeptiert.

Eine solche allgemein anwendbare und immunologisch verträgliche Stammzelltherapie könnte man mit geringem Einsatz an überzähligen Embryonen realisieren, wobei Klonen wohl gar nicht erforderlich wäre. Sie ließe sich wie jede andere Behandlung klinisch testen, wäre finanzierbar und könnte in 10 bis 15 Jahren in der klinischen Praxis ankommen.

Was wir jetzt dringend brauchen, ist eine öffentliche Diskussion, die auf dem beruht, was realistisch und sinnvoll ist. Visionen sind oft nützlich, um die Forschung zu inspirieren und voranzutreiben. Auf diesem Gebiet allerdings haben unrealistische Visionen wie das mit hohem Embryonenverbrauch verbundene therapeutische Klonen vielerorts eine Mehrheit gegen die neue Technologie aufgebracht. Dabei könnten realistische Konzepte, wie jene, die in Großbritannien bereits ohne vernehmlichen Protest verfolgt werden, auch anderenorts breite Zustimmung finden.

Michael Groß
www.michaelgross.co.uk



Nachwachsende Maschinen

Automaten können sich selbst vermehren.

Schon in den 1960er Jahren verglich der polnische Sciencefiction-autor Stanislaw Lem in seiner »Summa Technologiae« die technische Entwicklung mit der biologischen Evolution. Letztere nahm sich Jahrmilliarden Zeit für ein verschwenderisches Trial-and-Error-Verfahren, das aus den Kohlenstoffverbindungen der Ursuppe reproduktionsfähige Klümpchen und daraus schließlich intelligente Staaten bildende Vielzeller hervorbrachte – uns.

Die menschengemachte Technoevolution benötigte dagegen nur ein paar hundert Jahre, um nun die ersten Maschinen in die Welt zu setzen, die sich selbst zu kopieren vermögen. Ihr letzter Schrei ist ein Türmchen aus vier je zehn Zentimeter großen Würfeln, das sich einige Minuten lang knickt und windet, bis aus ihm und vier weiteren Würfeln zwei identische Türmchen hervorgegangen sind (siehe Spektrogramm, S. 10). Ersonnen wurde diese selbstreproduzierende Maschine von Hod Lipson und seinem Team an der Cornell-Universität in Ithaca (New York).

Ein bescheidener Anfang. Aber schon der primitive Vermehrungsvorgang lässt ahnen, wie verschieden die Technoevolution reproduktiver Automaten von ihrer biologischen Vorgängerin sein wird. Das beginnt mit dem Aggregatzustand: Die Bioevolution ist eine feuchte Angelegenheit, die ihren Anfang nach Darwins berühmten Worten »in einem kleinen warmen Tümpel« nahm und sich lange auf das Meer beschränkte. Hingegen sind Maschinen nicht flüssig, sondern fest. Die biologische Selbstreproduktion begann mit Tröpfchen, die technologische startet mit Klötzchen.

In lebenden Organismen regiert die Biochemie, während man, um Maschinen zu verstehen, in Physikbüchern nachschlagen muss. Die erwähnten replikativen Würfel haben ein Innenleben aus Drehgelenken und Elektronik und stellen den Außenkontakt zu ihresgleichen durch elektromagnetische Anziehung her.

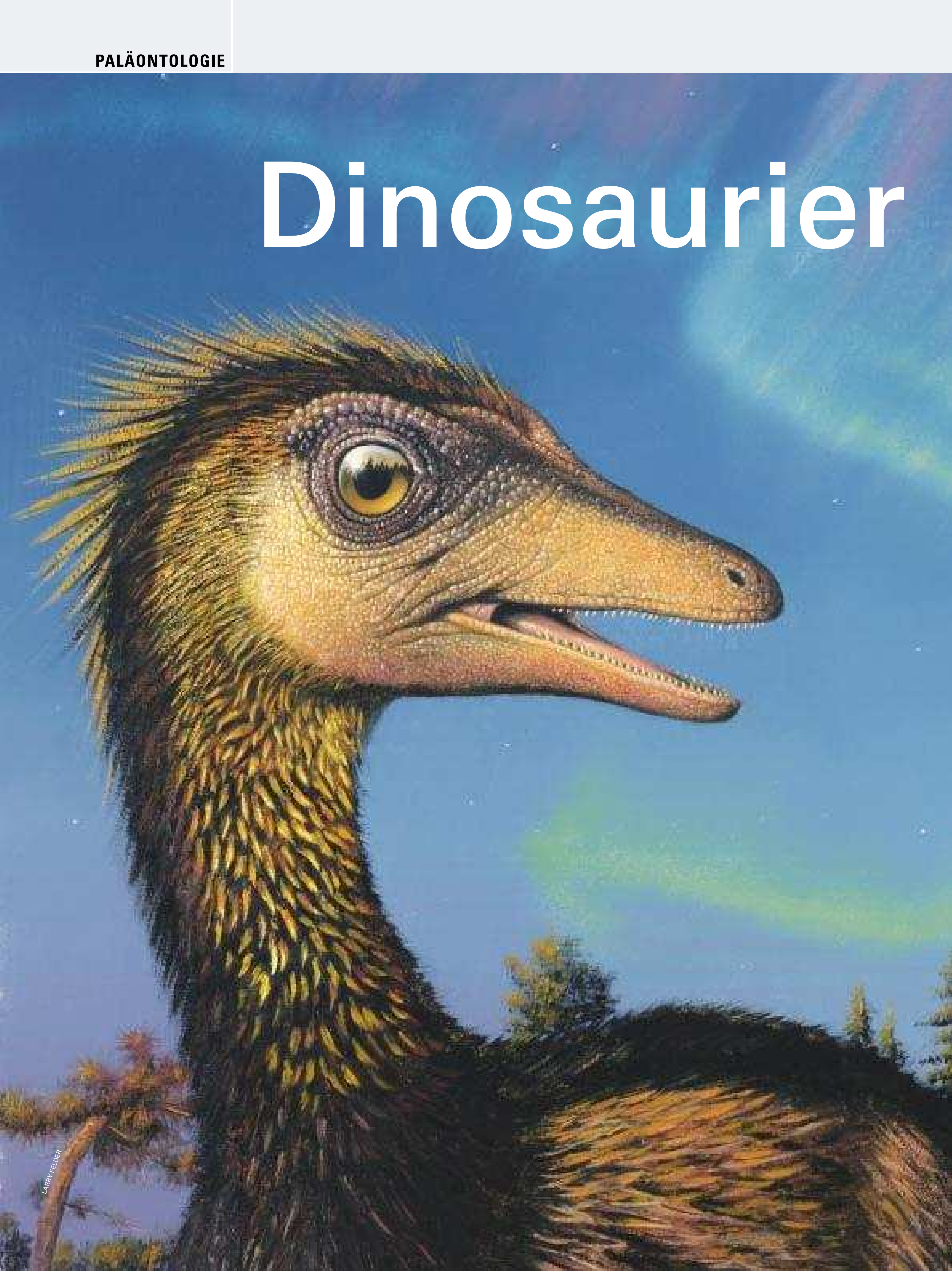
Warum, fragte seinerzeit Lem, ist die natürliche Selektion – anders als die Sciencefiction – nicht darauf gekommen, kristalline oder gasförmige Organismen zu entwickeln? Warum nicht solche, die sich elektromagnetischer Kräfte oder gar der Nuklearenergie bedienen? Der Grund: Die irdische Bioevolution emanzipierte sich nicht von ihrem flüssig-chemischen Ursprung. Sie hat zwar Panzer und Skelette entwickelt, aber immer als Verfestigung flüssiger oder gallertiger Vorformen, nie als separat produzierte und nachträglich zusammengefügte Bauteile.

Deshalb konnte die natürliche Evolution auch nie das Rad »erfinden«. Dieser erste Geniestreich der Technoevolution schuf eine Nabe und einen sie eng umschließenden, aber völlig unverbundenen Rotationskörper. Natürliche Gelenke entstehen in embryonalen Gliedmaßen, bleiben durch Muskeln und Sehnen verknüpft und würden durch eine volle Drehbewegung irreparabel ruiniert. Darum gibt es trotz der verschenkten Energieersparnis kein Insekt, das auf sechs Rädern rollend mit kräftigen Fühlern oder Scheren durchs Gras rudert, und keinen Vogel, der statt zu flattern die Flügel wie Propeller kreisen lässt.

Die technische Entwicklung wird solche selbstreproduzierenden künstlichen Organismen vermutlich bald gezielt züchten – in erster Linie für lebensfeindliche Umgebungen wie den Weltraum, Katastrophengebiete oder Schlachtfelder. Auch das hat Lem bereits vorgeführt: In seinem Roman »Der Unbesiegbare« von 1964 kämpfen Schwärme von Roboterfliegen gegen irdische Invasoren. Für den Alltagskonsum hingegen dürften allenfalls kleine Putzteufel abfallen, die Staub sammeln und Milben jagen. Uns werden solche Wesen so wenig anheimeln wie Insekten.



Dinosaurier



LARRY FELDER

der Arktis

Die herrschende Tiergruppe des Erdmittelalters kam sogar mit der Winternacht des hohen Nordens zurecht. In Nordalaska lebten vor siebzig Millionen Jahren mindestens acht Dinosaurierarten.

Von Antony R. Fiorillo



Vorsichtig arbeite ich mich mit dem kleinen Besen tiefer – und plötzlich erkenne ich die grotesk gehörnte Schnauze eines *Pachyrhinosaurus* (Bild S. 28). Von ein paar seiner Artgenossen waren in Alaska zwar schon Fossilien aufgetaucht, doch ich sehe deutlich, dass bei diesem Exemplar Partien des Schädels erhalten sind, die bei den anderen Funden fehlten.

Ich ahnte in dieser Saison allerdings noch nicht, dass unter unseren Füßen noch weitere sieben solche skurrilen Schädel lagen. Die Tiere waren ungefähr gleich alt gewesen. Offenbar kamen sie gemeinsam um, vielleicht bei einer Flutkatastrophe. Diese Dinosaurier sind seltene Verwandte der einst in Nordamerika häufigen Gattung *Triceratops*, bulligen, bis zu acht Meter langen Vierfüßern mit drei Hörnern auf Nase und Stirn und einem großen knöchernen Nackenschild. Die Ansammlung von Pachyrhinosauriern lieferte uns den ersten Hinweis darauf, dass diese Reptilien nördlich des Polarkreises in Gruppen lebten.

◀ **Dieser großäugige Raubsaurier beherrschte die Tierwelt Nordalaskas in der ausgehenden Kreidezeit. *Troodon* maß bis zu drei Meter – damit überragte er Artgenossen, die weiter im Süden des Kontinents lebten.**

An dem entlegenen Fleckchen ganz im Norden Alaskas – ein Steilhang mit Blick über den Fluss Colville – fanden wir außerdem Überreste von mindestens drei anderen Dinosaurierarten. Ich war im Sommer 2002 mit Kollegen vom Museum für Naturgeschichte und von der Southern Methodist University in Dallas (Texas) sowie von der Universität von Alaska in Fairbanks angereist, um einen *Pachyrhinosaurus*-Schädel zu bergen, auf den ich im Jahr zuvor gestoßen war. Vor fast zehn Jahren hatten Forscher der Universität von Alaska die Fundstätte entdeckt. Doch erst viel später begriffen wir allmählich, dass der Ort eine umfangreiche, wertvolle Ansammlung von Dinosaurierfossilien barg.

Ein komplettes Skelett von einem der urzeitlichen Riesenreptilien haben wir oder andere Forscher bisher in Alaska noch an keinem Ort finden können, auch nicht an anderen Fundstellen (siehe Karte S. 27). Anhand von Teilskeletten, einzelnen Knochen, Zähnen und auch fossilen Fußspuren lassen sich dennoch acht verschiedene Dinosaurier bestimmen, die in Nordalaska in der gleichen Zeitspanne vorkamen (siehe Bild S. 28/29).

All diese Funde von Alaska stammen aus der Kreidezeit (dem letzten Abschnitt des Erdmittelalters), die sich von vor 145 Millionen Jahren bis vor 65 Millionen Jahren erstreckte. Der Großteil der Tiere lebte vor 75 bis 70 Millionen Jahren, also nach erdgeschichtlichem ▷

▷ Maßstab kurz vor dem Untergang der ganzen Gruppe am Ende der Kreidezeit. Obwohl wir die arktischen Reptilien erst seit relativ wenigen Jahren erforschen, wissen wir bereits manches darüber, welche Dinosaurier so weit im Norden lebten. Wir beginnen auch zu verstehen, wie es die großen Reptilien dort überhaupt aushielten.

Herden von Schnabeldrachen

Vier der gefundenen Arten waren Pflanzenfresser, vier weitere Raubtiere, die es unter anderem auf diese Pflanzenfresser abgesehen hatten (siehe Bild S. 28/29). Die Fleischfresser gehörten sämtlich zu den Theropoden, jenen zweibeinigen Räubern, unter denen der *Tyrannosaurus* am berühmtesten ist. Besonders der hohe Norden Alaskas erweist sich als ergiebig für Fossilien von beiden Gruppen.

Den Häufigkeitsrekord stellt in Alaska *Edmontosaurus* auf, ein Hadrosaurier mit charakteristischer Schnauzenform – deswegen auch Entenschnabel-Dinosaurier oder Schnabeldrache genannt. Von diesem *Edmontosaurus* haben wir darum schon ein recht gutes Bild. Manche Hadrosaurier aus anderen Gegenden maßen bis zur Schwanzspitze deutlich über zehn Meter. In einem flachen, breiten Maul saßen einige hundert Zähne, mit denen das Tier zähe Pflanzenkost zermalmte, die es sich auch auf den Hinterbeinen stehend angeln konnte. Ansonsten ging das Reptil auf allen vieren, wahrscheinlich schaukelnd, denn die Hinterbeine waren länger als die Vorderbeine.

Im Gegensatz zu vielen anderen Schnabeldrachen trug *Edmontosaurus* auf dem Kopf keinen Knochenkamm. Mit bis zu fast zwei Tonnen Gewicht zählte er zu den größten Hadrosauriern Nordamerikas. Wie bei den anderen Arten der Schnabeldrachen handelte es sich um gesellige Tiere, die sich zu Herden zusammenschlossen. Man findet *Edmontosaurus*-Fossilien an den Lagerstätten Nordalaskas oft zuhauf, als wäre der ganze Trupp von einer plötzlichen Überschwemmung überrascht worden.

Noch ist in Alaska keine Dinosaurierart aufgetaucht, die nicht auch anderswo im westlichen Nordamerika vorkam – was umgekehrt nicht gilt. Denn anscheinend behaupteten sich hier weniger Arten als weiter im Süden – das typische Muster für höhere Breiten, wie es auch für jetzige Ökosysteme gilt. Die heutige geringere Artenzahl wird mit den begrenzten Ressourcen im hohen Norden erklärt. Galten ähnliche Gesetzmäßigkeiten auch für die Reptilienriesen?

Alaska als Dinosaurier-Heimat jenseits des Polarkreises ist keine Ausnahme. Auf der südlichen Halbkugel fanden Judd Case vom St. Mary's College of California und seine Kollegen in der Antarktis Zeugnisse von Dinosauriern. Die Forscher bargen Fossilfragmente von Theropoden, Hadrosauriern und noch einigen anderen Dinosauriergruppen in Gesteinen ähnlichen Alters wie die im Norden. Auch an der Südspitze Australiens, das einst viel weiter südlich lag als heute, waren die Reptilien verbreitet. Die Tiere, deren Überreste Patricia Vickers-Rich und Thomas Hewitt Rich von der australischen internationalen Monash University dort entdeckten, müssen einst nah beim Südpol gelebt haben, allerdings bereits in der frühen Kreide, also eher als die in Alaska.

Was verschlug die Dinosaurier so weit in den Norden? Da in Asien von fast allen nordamerikanischen Dinosaurierfamilien der Kreidezeit Vorläufer lebten, stammten auch die Arten in Alaska mit großer Wahrscheinlichkeit von asiatischen Vorfahren ab. Die Mehrzahl der Paläontologen vermutet, dass die Reptilien Amerika über eine zeitweise vorhandene Landbrücke zwischen den beiden Kontinenten erreichten, die mehrmals anstelle der heutigen Beringstraße existierte.

Die Anordnung der Kontinentalplatten während der Kreidezeit lässt darauf schließen, dass die Landbrücke zum ersten Mal vor etwa 100 Millionen Jahren bestand und später noch zweimal. Von den Einwanderern zogen manche nach Süden, andere aber blieben im hohen Norden. Offensichtlich sagten ihnen die Verhältnisse dort zu.

Eine Ausnahme der nordamerikanischen Dinosaurier war von seiner Herkunft her wohl nur der zwanzig Meter lange Pflanzen fressende Sauropode *Alamosaurus*, der aber nicht bis Alaskas kam. Der Pflanzenfresser dürfte von Süden zugewandert sein. Überreste seiner Vorfahren fand man in Südamerika und Afrika, die früher zusammenhingen.

Von den riesigen geologischen Blöcken, aus denen das heutige Alaska besteht, entstanden einige zwar ganz woanders. Während der Kreidezeit befanden sich allerdings viele in der Nähe ihrer heutigen geografischen Breite oder sogar noch weiter nördlich. Die Dinosaurierfossilien von Alaska wurden demnach nicht nachträglich mit driftenden Platten aus einer anderen Klimazone nach Norden verfrachtet. Vielmehr lebten diese Dinosaurier tatsächlich in der Kreidezeit in so hohen Breiten. Da stellt sich die Frage, ob, und wenn ja, wie sie die arktischen Winter überstanden – oder ob sie für die kalte, dunkle Jahreszeit weiter nach Süden wanderten.

Winterharte Dinosaurier?

Welches Klima herrschte in Alaska überhaupt vor 75 oder 70 Millionen Jahren? Allgemein war die Welt damals wärmer. Die hohen Breitengrade boten dadurch aber keineswegs komfortable Verhältnisse. Die Winter waren kalt, es lag Schnee, und während einiger Monate blieb es jenseits des Polarkreises ziemlich dunkel. Fossilien von Pollen, Blättern und Holz geben Auskunft über die damalige Vegetation und damit das Klima: In Nordalaska wuchs ein Nadelmischwald mit sommergrünen Nadelhölzern und einem Unterwuchs von Blütenpflanzen, Farnen und Palmfarnen. Heutige Nadelwälder gedeihen in einem zwar weiten, aber gut abgrenzbaren Klimabereich – bei einer Jahresdurchschnittstemperatur zwischen drei und dreizehn Grad Celsius. In Nordalaska dürften demnach in der Kreidezeit etwa diese mittleren Temperaturen geherrscht haben.

Und wie überstanden die Dinosaurier die Polarnacht? Alaska lag damals noch weiter nördlich als heute. Dennoch stellt man sich die Lichtverhältnisse im ▷

IN KÜRZE

- Erst seit zwanzig Jahren wissen Paläontologen, dass **Dinosaurier auch im Norden Alaskas** beheimatet waren.
- Bisher fanden sich dort **Fossilien von acht Dinosaurierarten**, die dort vor 75 bis 70 Millionen Jahren lebten – kurz vor dem Ende des Erdmittelalters.
- Für den arktischen Winter müssen diese **Saurier mit besonderen Anpassungen** ausgestattet gewesen sein. Dazu gibt es schon erste Befunde.

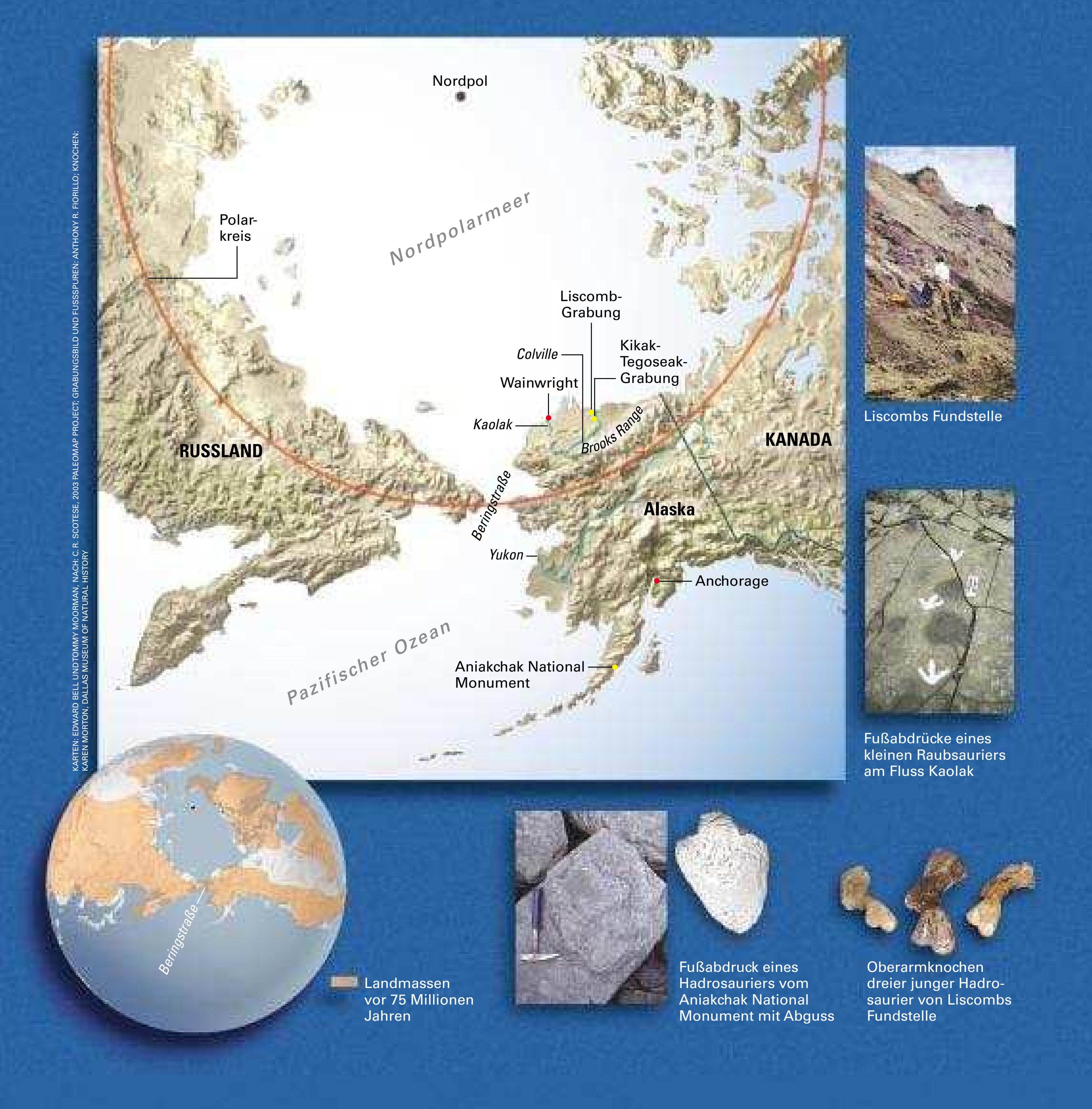
Dinosaurier jenseits des nördlichen Polarkreises

Die große Karte zeigt wichtige Fundgebiete von Dinosauriern in Alaska. Während der Kreidezeit, der letzten Phase des Erdmittelalters, existierte zwischen Asien und Nordamerika mehrfach eine Landbrücke (siehe Globus unten links). Darüber dürften die Riesenechsen aus Asien eingewandert sein, teils weiter nach Süden, teils auch nach Alaska.

Am Ort der Liscomb-Grabung (oberes Foto rechts) fanden die Forscher unter anderem eine Gruppe junger Hadrosaurier (die auch Entenschnabel-Dinosaurier genannt werden, siehe Foto von Knochen unten rechts).

Am Fluss Kaolak tauchten Fußabdrücke eines kleinen Raubsauriers auf, die hier mit einer weißen Silikonmasse ausgegossen wurden (zweites Foto rechts von oben).

Der Fußabdruck eines Hadrosauriers vom Aniakchak National Monument im südlichen Alaska wurde ausgegossen und nachgeformt (Foto unten Mitte).



Liscombs Fundstelle

Fußabdrücke eines kleinen Raubsauriers am Fluss Kaolak

Fußabdruck eines Hadrosauriers vom Aniakchak National Monument mit Abguss

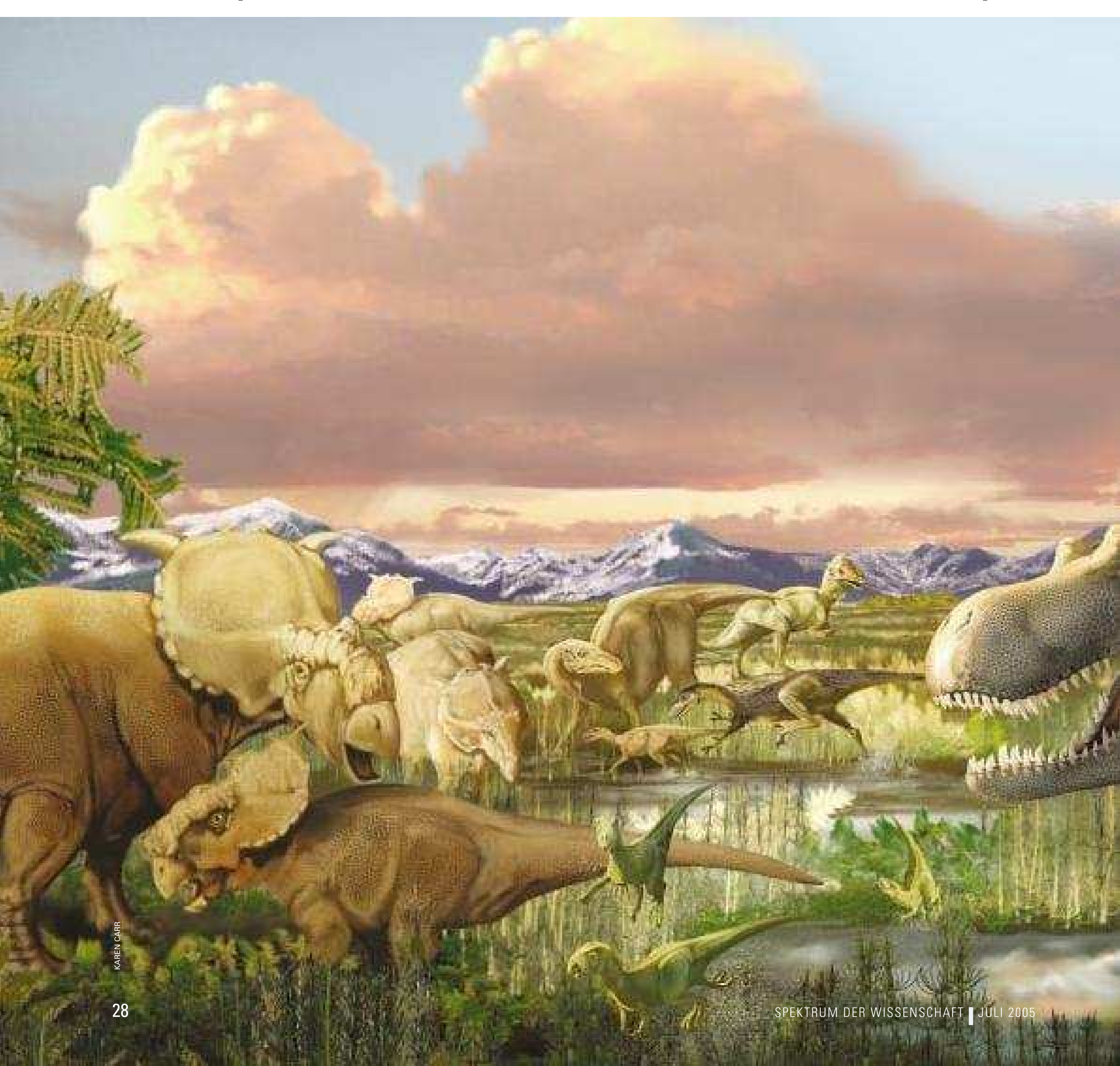
Oberarmknochen dreier junger Hadrosaurier von Liscombs Fundstelle

polaren Winter oft falsch vor. Auch wenn die Sonne in Breiten über dem Polarkreis für einige Zeit überhaupt nicht mehr erscheint (am Polarkreis an einem Tag mitten im Winter, weiter nördlich immer länger), bedeutet das nicht durchgehend völlige Dunkelheit, sondern zunächst nur helles Dämmerlicht. Erst in der Wintermitte bleibt es weit im Norden ganz dunkel. Völlige Nacht herrscht umso länger, je näher man dem Nordpol ist – aber keineswegs ein halbes Jahr.

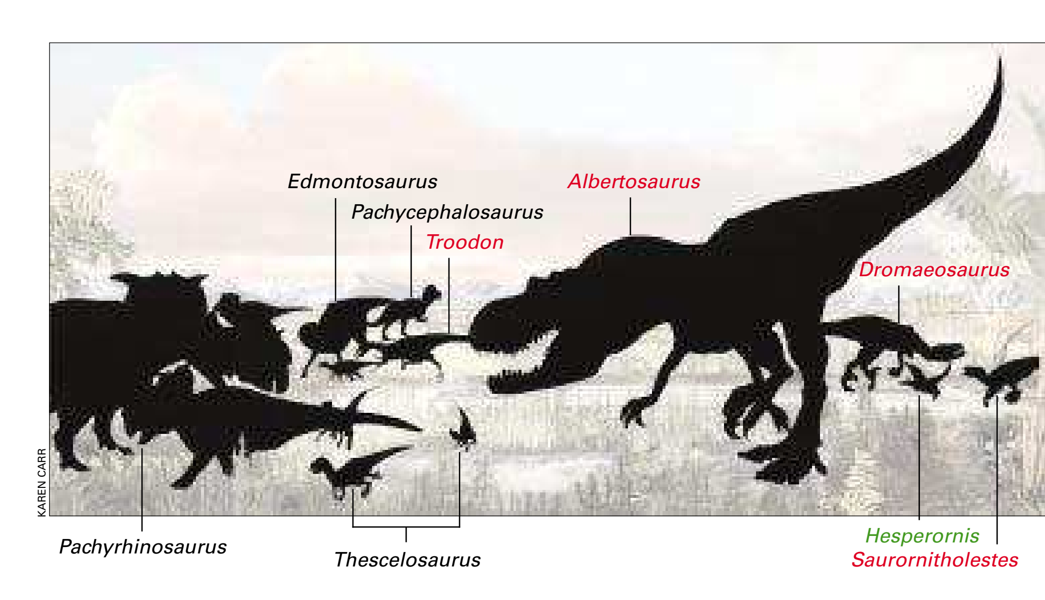
Wie sich die Dinosaurier an Dunkelheit und Kälte anpassten und wie besonders ein Pflanzenfresser wie *Edmontosaurus* diese Phase überbrückte, wissen wir nicht im Einzelnen. Schwer vorstellbar ist, dass sich die zehn Meter langen Hadrosaurier im Herbst tiefe Löcher gruben, in denen sie dann bis zum Frühjahr Winterschlaf hielten. Allerdings können manche heutigen Tiere ihren Stoffwechsel in kargen Zeiten drosseln und benötigen dann wenig Nahrung. Vielleicht verfügten die arktischen Dinosaurier über einen ähnlichen Mechanismus, der sie über die schlechte Jahreszeit rettete, ohne dass sie in einen echten Winterschlaf verfielen.

Nicholas Hotton III von der Smithsonian Institution in Washington hatte einen anderen Vorschlag. Demnach wären die riesigen Hadrosaurier im Winter tausende Kilometer weit bis in Gegenden gezogen, wo es wärmer und heller war und sie Pflanzennahrung fanden. Andere Forscher haben dieses Modell weiter ausgebaut. Sie führten an, die Karibus – die nordamerikanischen Rentiere – würden mit ihren Herden auch Jahr für Jahr solche Distanzen zurücklegen.

Dieser Vergleich reizte Roland Gangloff vom Museum der University of Alaska und mich, ihn einmal zu überprüfen. ▷


KAREN CARR

Acht Dinosaurier lebten nach bisheriger Kenntnis vor 75 Millionen Jahren in Alaska: vier Pflanzen fressende Arten (rechts schwarz beschriftet) und vier Fleischfresser (rot beschriftet). In der Region wuchsen damals unter anderem Nadelbäume: Zypressen und Verwandte der Mammutbäume. Die Schneeberge im Hintergrund stellen das damalige Brooks Range dar. Im Bild rechts unten scheucht ein *Saurornitholestes* einen für die Zeit typischen, über einen Meter großen Vogel namens *Hesperornis* auf.



Wir fragten uns, ob junge Hadrosaurier wohl schon die erforderliche Kondition für eine so weite Wanderung besaßen. Karibus wachsen schnell. Bei drei arktischen Herden bestimmten wir Gewicht und Größe der Kälber im ersten Herbst. Wenn sich die Herde auf den Weg macht, haben die Jungtiere 80 bis 85 Prozent der Körpermaße von erwachsenen Tieren und 53 bis 74 Prozent ihres Gewichts erreicht.

Unter den zahlreichen Fossilien der Entenschnabel-Dinosaurier waren auch welche von recht kleinen Exemplaren. Wie sich anhand der Knochenstruktur herausstellte, handelte es sich eindeutig um junge Tiere – nicht etwa um eine nordische Zwergrasse. Wie aus der Zellstruktur zu schließen ist, waren diese jungen Hadrosaurier schon mindestens ein Jahr alt. Nach den Längen ihrer Knochen schätzten wir, dass diese Jungtiere erst etwa 27 bis 37 Prozent der Ausmaße von erwachsenen Artgenossen und vielleicht nur 11 Prozent von deren Körpermasse besaßen. Noch mit einem Jahr oder mehr hätten sie deutlich weniger an Statur aufgewiesen als die jungen Karibus schon vor ihrem ersten Winter. Darum halten wir weite saisonale Wanderungen der Hadrosaurier für sehr unwahrscheinlich. Die Jungen hätten wohl nicht Schritt halten können. Leider haben wir in Alaska bisher weder Nester noch Eier dieser Dinosaurier gefunden – was der Beweis wäre, dass die Jungtiere dort zur Welt kamen.

Nur – was fraßen die Riesenechsen im Winter? Die Fleischfresser ernährten sich unseres Erachtens auch jetzt von Tieren. Zumindest deuten die Abnutzungsspuren an ihren Zähnen nicht auf einen jahreszeitlichen Wechsel der Ernährungsweise hin. Schwerer ist die Frage für die Pflanzenfresser zu beantworten.

Hadrosaurier mit gutem Magen

Der Schnabeldrache *Edmontosaurus* bietet sich für Spekulationen an. Er hatte ein großes Verbreitungsgebiet, das sich vom nördlichen Alaska bis nach Westtexas erstreckte – ähnlich wie heute das nordamerikanische Dickhornschaf, ebenfalls ein Pflanzenfresser. Die Kost von Schafen, die im Süden leben, ist nicht so vielseitig wie die von Artgenossen im Norden. Vermutlich können die Tiere im Süden bei dem reicheren Angebot wählerischer sein. Vielleicht verhielt sich *Edmontosaurus* ähnlich und verspeiste so ziemlich alles, was überhaupt fressbar war, während sich seine Verwandten im Süden vor allem an ihr Lieblingsfutter halten konnten.

Für das Dauerleben jenseits des Polarkreises müssten die betreffenden Arten spezielle Anpassungen gehabt haben. Das zurzeit beste Beispiel sind die Augen eines Fleischfressers namens *Troodon* (siehe Bild S. 24). Von diesem in vielen Gegenden Nordamerikas verbreiteten Saurier finden die Paläontologen vor allem einzelne Zähne. An Fundstellen weiter im Süden, etwa in Alberta (Westkanada), in Montana (Nordwesten der USA) und in Texas, sind solche Zähne rar. Doch in Alaska tauchen sie regelmäßig auf. Dort muss eine recht große und weit verbreitete Population dieser Räuber gelebt haben.

Im Vergleich zu anderen Raubdinosauriern hatte *Troodon* auffallend große Augen – sogar die Tiere, die im Süden lebten. Bei heutigen Arten bedeutet das in der Regel eine Anpassung an schwaches Licht. Es könnte sein, dass *Troodon* seine großen Augen sozusagen mitbrachte, als das Tier Alaska besiedelte. In der Winternacht erwiesen sie sich dann als ein Vorteil. Das Reptil konnte in der dunklen Jahreszeit besser sehen als seine Konkurrenten. So wurde es in diesem Ökosystem zum häufigsten Raubtier.

Schicksalhafte Forschung

Im Jahr 1961 fand Robert L. Liscomb, Geologe des Erdölkonzerns Shell, in Nordalaska eine Hand voll besonders gut erhaltener Knochen eines *Edmontosaurus*, eines Schnabeldrachen. Allerdings hielten er und seine Kollegen die Fossilien für Säugetierreste. Liscomb kam im nächsten Jahr bei einem Erdrutsch ums Leben – und so verfolgte zunächst niemand die Angelegenheit weiter.

Erst Mitte der 1980er Jahre fanden Henry Roehler und Gary Stricker vom Geologischen Vermessungsdienst der USA (USGS) in Nordwestalaska wiederum Fossilien von Dinosauriern, darunter auch Hautabdrücke. Die Organisation wurde bald darauf Eigentümer der von Liscomb entdeckten Knochen, deren Wert Charles A. Repenning erkannte. Nun spürten Feldforscher vom Vermessungsdienst den alten Fundort wieder auf.

Dort setzen Ende der 1980er Jahre Mitarbeiter der Universität von Kalifornien und der Universität von Alaska die Arbeit fort. Seit 1998 nahm auch der Autor dieses Artikels daran teil.

Der Autor Anthony Fiorillo an Liscombs Fundstelle beim Freilegen des Schädels eines *Pachyrhinosaurus*



DAWN ROBERTS

Ein Hubschrauber der US-Armee, die gerade in der Nähe ein Manöver abhält, hilft nahe Kikak-Tegoseak beim Abtransport eines Plastiksacks mit Teilen von drei *Pachyrhinosaurus*-Schädeln.

ANTHONY R. FIORILLO

Allerdings musste sich der Jäger auch im langen, nachtlosen Sommer zurechtfinden. Vielleicht hielt er sich dann vorwiegend im Wald auf. Selbst lichte Gehölze sind ja deutlich dunkler als offenes Gelände. Sicherlich fand dieser Räuber auch unter schattiger Vegetation gut seine Beute.

Die Augengröße der anderen Dinosaurier Alaskas kennen wir noch nicht. Teils sind die bekannten Schädel nicht vollständig genug, teils wird es noch dauern, die Fossilienfragmente zusammenzusetzen. Interessanterweise fanden aber Tom und Pat Rich bei einigen der antarktischen Dinosaurier Australiens besonders große Augenhöhlen. Dabei handelte es sich um ganz andere Tiere als in Alaska, die außerdem viel früher lebten.

Der Herrscher im Ökosystem

Auffällig ist, dass *Troodon* in Alaska bis zu drei Meter maß und damit fast doppelt so groß wurde wie seine Vettern in südlicheren Gefilden des gesamten Verbreitungsgebiets. Dagegen fiel die Körpergröße der Pflanzen fressenden Dinosaurier von Nordalaska keineswegs aus dem Rahmen. Vielleicht verdankte *Troodon* seine Gardemaße seinen großen Augen. In den langen Dämmerlichtphasen stach er seine Konkurrenz aus, wurde schließlich zum wichtigsten Raubtier und konnte an Größe zulegen. Ein ähnliches Phänomen beobachten Naturschützer heute in einigen amerikanischen Ökosystemen: Wo keine Wölfe mehr existieren, werden anscheinend mitunter die Kojoten größer.

Zu den arktischen Dinosauriern bleibt noch vieles zu erforschen. Eine der faszinierendsten, durchaus ernst gemeinten Fragen ist, ob sie das große Sauriersterben am Ende der Kreidezeit in dieser abgelegenen Region überlebt haben könnten. Nach Ansicht der meisten Paläontologen führte ein Meteoriteneinschlag den praktisch schlagartigen weltweiten Untergang der Dinosaurier herbei (siehe SdW 2/2005, S. 48). Der Einschlagsort ist vermutlich, wenn auch neuerdings wieder umstritten, der Chicxulubkrater in Mexiko. Fernwirkungen einer solchen mutmaßlichen geologischen und klimatischen globalen Katastrophe würden sich gut in einem weit abgelegenen Gebiet wie Alaska studieren lassen.

Leider gibt es von dort aus der fraglichen Zeit bisher noch keine Dinosaurierfunde. Ob Alaskas Riesenreptilien schnell oder allmählich verschwanden, wissen wir darum nicht. Die Aussicht, hierüber mehr zu erfahren, ist aber gut: Nach den Analysen fossiler Pollen könnten die Nordregion Alaskas wie auch einige andere Orte Gesteinsschichten bieten, die genau das passende Alter haben. Es kommt nun darauf an, ob sie außer Pollen auch Tierfossilien bergen. Dieser Befund stachelt uns bei der Fossiliensuche an. Noch haben wir ja erst an der Oberfläche gekratzt. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Anthony R. Fiorillo ist Kurator für Erdgeschichte am Dallas Museum für Naturgeschichte und außerordentlicher Professor an der Southern Methodist University in Dallas (Texas).

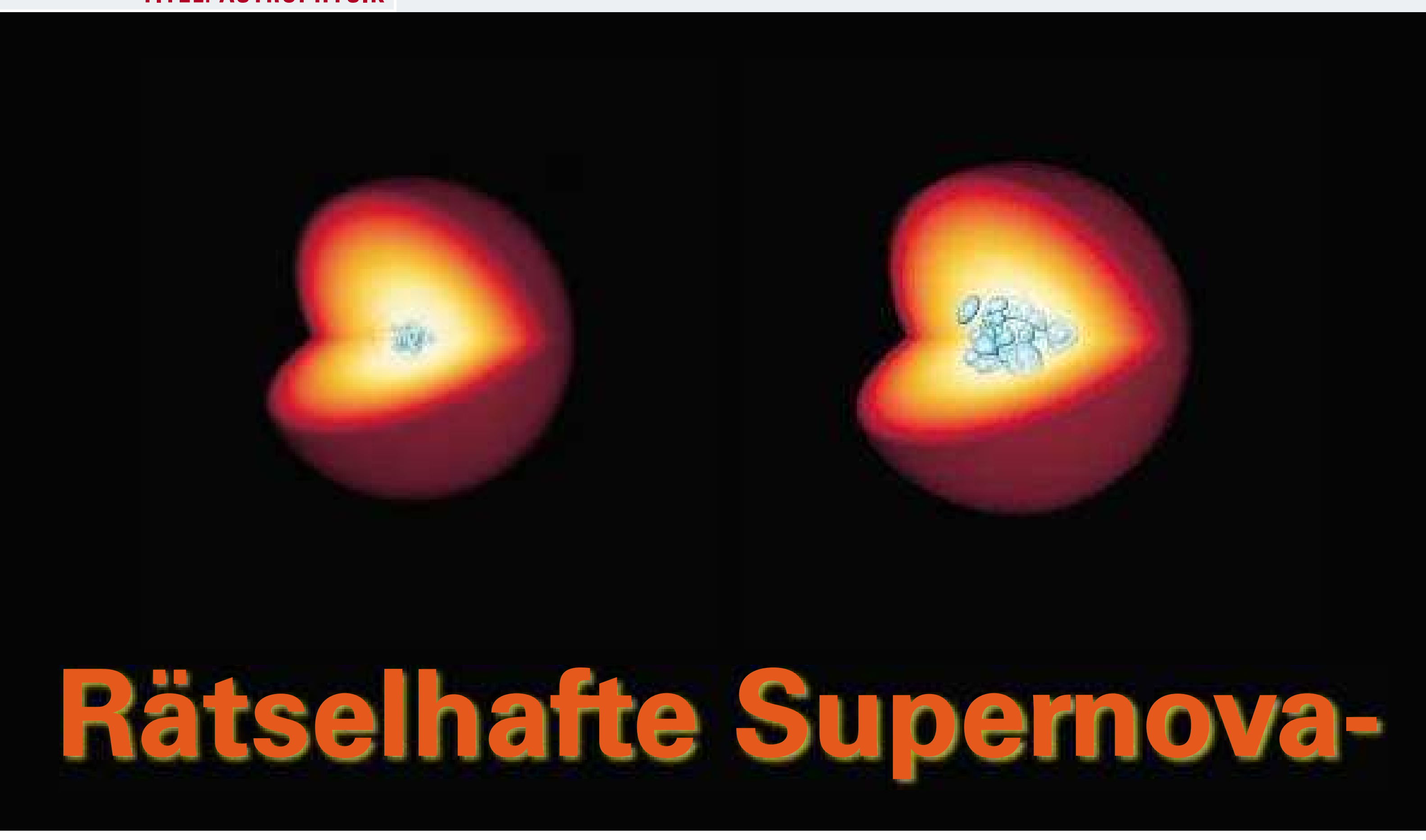
Tiere der Urzeit. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/2005

Saurier und Urvögel. Spektrum der Wisenschaft, Digest 5, 1/1997

Dinosaurs: The science behind the stories. Von J. G. Scotchmoor, D. A. Springer, B. H. Breithaupt und A. R. Fiorillo. American Geological Institute, 2002

Polar dinosaurs. Von T. H. Rich, P. Vickers-Rich und R. A. Gangloff in: Science, Bd. 295, 8. Februar 2002, S. 979

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Rätselhafte Supernova-

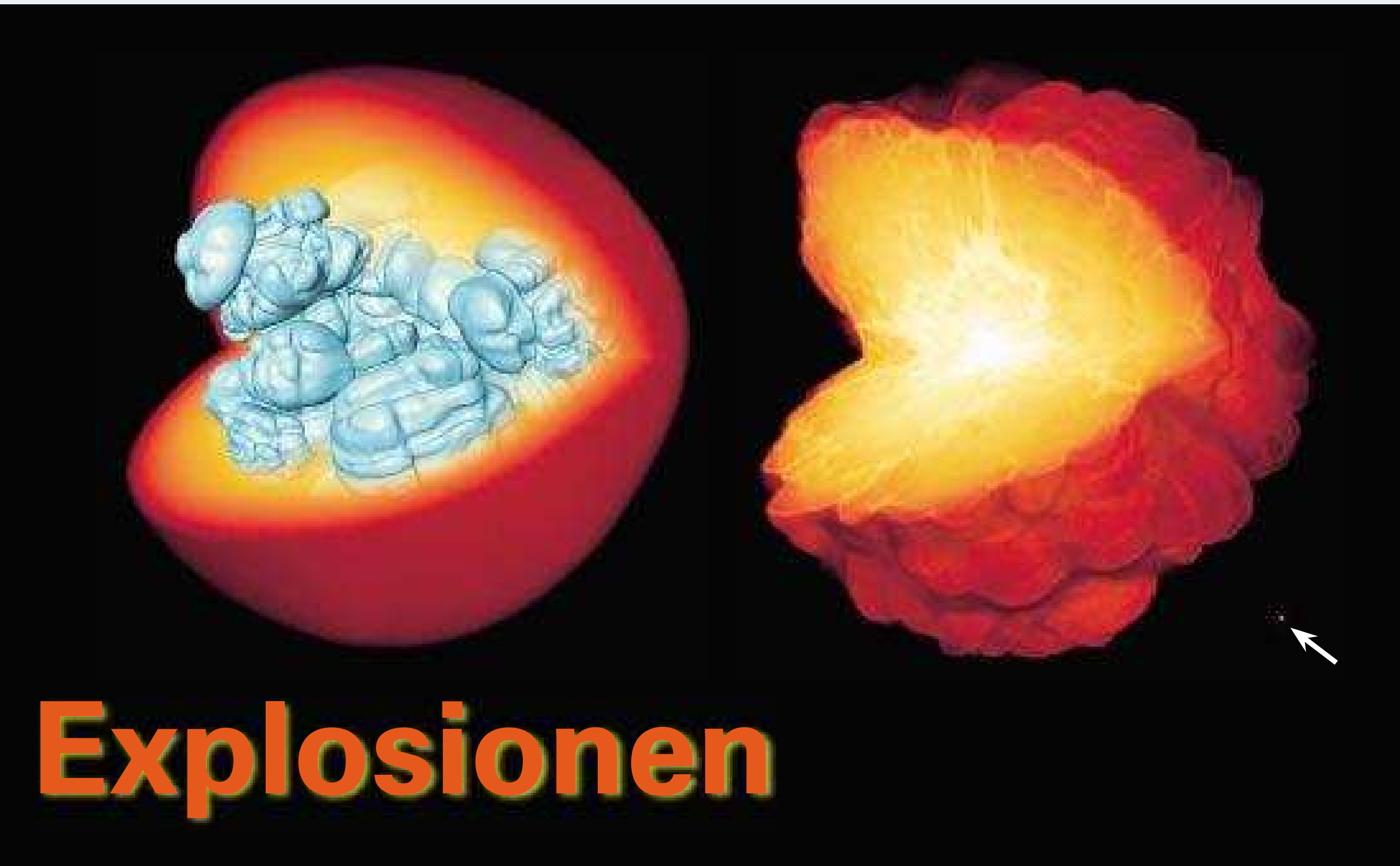
Die gewaltigen Kataklysmen, mit denen Sterne ihr spektakuläres Ende finden, haben sich als turbulente und hochkomplexe Vorgänge entpuppt. Nicht einmal aufwändigste Simulationsrechnungen konnten ihnen bisher alle Geheimnisse entreißen.

Von Wolfgang Hillebrandt, Hans-Thomas Janka und Ewald Müller

Als der dänische Astronom und Adlige Tycho Brahe am 11. November 1572 im Sternbild Cassiopeia einen neuen Stern entdeckte, der heller aufleuchtete als der Planet Jupiter, war das eine Sensation – mit Tychos Worten »ein Wunder, wie es seit Anbeginn der Welt nicht gesehen wurde«. Heute sind viele Wissenschaftshistoriker der Meinung, dass damals die moderne Astronomie begann.

Obwohl Tycho mit seiner Behauptung übertrieb – chinesische Astronomen hatten über solche neuen Sterne bereits mehr als 500 Jahre früher berichtet –, zeigt seine Begeisterung doch, wie wichtig diese Entdeckung für die neuzeitliche Wissenschaft war. Erstmals wurde offenbar, dass der Fixsternhimmel nicht unveränderlich ist, und diese Erkenntnis sollte unser Weltbild nachhaltig verändern. Tycho Brahes Beobachtungen, die er zwei Jahre später veröffentlichte, zeigten zweifelsfrei, dass der neue Stern zumindest weiter von der Erde entfernt sein musste als der Mond; also gehörte er zum Firmament der Sterne. Das Gleiche wurde einige Jahre später von Galileo Galilei für Johannes Keplers Supernova (SN 1604) bestätigt. Der dänische König war von Tycho Brahes Entdeckung so beeindruckt, dass er ihm die Mittel gab, auf der Ostseeinsel Hven eine neue Sternwarte zu erbauen, ausgestattet mit besonders großen und genauen Instrumenten.

Allerdings dauerte es dann noch mehr als 400 Jahre, bis man erkannte, dass einige dieser »Novae« – von lateinisch »neue« Sterne – außergewöhnlich hell erstrahlen: Für einige Wochen erreichen sie fast die Leuchtkraft einer ganzen Galaxie mit vielen Milliarden Sternen. 1885 entdeckten Ludovic Gully in Rouen (Frankreich) und Ernst Hartwig in Dorpat (Estland) unabhängig voneinander in der Nähe des Zentrums des Andromeda-Nebels eine Nova (S Andromeda genannt). Sie erreichte ungefähr ein Zehntel der Helligkeit des Nebels. Da damals noch nicht bekannt war, dass der Andromeda-Nebel eine Galaxie sehr ähnlich unserer eigenen Milchstraße ist, fand die Entdeckung nur wenig Beachtung. Erst als Knut Lundmark 1919 die Entfernung zur Andromeda-Galaxie mit etwa 700 000 Lichtjahren abschätzte – etwa um den Faktor drei zu nahe, wie wir heute wissen –, war plötzlich klar, das S Andromeda einige tausend Mal heller gewesen sein musste als eine »nor-



Explosionen

ALLE COMPUTERSIMULATIONEN: MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR ASTROPHYSIK, GARCHING

▲ Die dreidimensionale Simulation einer Supernova-Explosion vom Typ Ia zeigt in vier Schnappschüssen – zu Beginn der Zündung sowie nach 0,3, 0,6 und 10 Sekunden – die thermonukleare Explosion eines Weißen Zwergs. Die Dichte des Sterns ist farbkodiert dargestellt; die blaue Struktur gibt die thermonukleare »Flamme« wieder. Der Größenmaßstab expandiert mit der Supernova. Zum Vergleich: Das Kügelchen rechts unten im letzten Bild zeigt, wie groß der Weiße Zwerg anfangs war (Pfeil).

male« Nova in unserer Milchstraße. Der schweizerisch-amerikanische Astrophysiker Fritz Zwicky prägte dann 1933 für sie den Namen Supernova.

Zwicky selbst war auch der Erste, der systematisch nach solchen heftigen Sternexplosionen zu suchen begann. Im Lauf seines sehr aktiven wissenschaftlichen Lebens entdeckte er 123 Supernovae – bis heute Weltrekord für einen einzelnen Astronomen.

Heller als Milliarden Sonnen

Sehr schnell wurde klar, dass nicht alle Supernovae gleich sind, sondern sich in mindestens zwei Hauptklassen aufteilen. Die Mitglieder der einen Klasse zeigen in ihren Spektren nicht einmal Spuren von Wasserstoff, während bei den anderen zu Beginn Wasserstoff sogar dominiert. Der deutsch-amerikanische Astronom Rudolf Minkowski schuf 1939 für sie die Namen Typ I und Typ II. Seither hat man diese grobe Klassifizierung verfeinert.

In den 1930er Jahren war der Grund für die gewaltigen Explosionen noch weit gehend unverstanden, doch erneut hatte Fritz Zwicky eine geniale Idee. Bereits 1938 spekulierte er, dass die Explosionsenergie von der Gravitation stamme.

Zu diesem Zweck »erfand« er so genannte Neutronensterne: Ein normaler Stern stürzt zusammen, bis in seinem Innern die Dichte so hoch ist wie in einem Atomkern. In diesem Zustand besteht die Materie überwiegend aus ungeladenen Kernteilchen, den Neutronen – daher der Name. Nach Zwicky treibt die beim Kollaps frei werdende Gravitationsenergie die Explosion der Sternhülle an. Ja, er vermutete sogar, der Krebs-Nebel im Sternbild Stier sei das Ergebnis der »chinesischen« Supernova von 1054, und der eigenartige Stern in seinem Zentrum sei der dabei entstandene Neutronenstern – eine großartige Vorhersage, wie wir heute wissen (siehe »Neutronensterne: ultradichte Exoten« von Jérôme Novak, Spektrum der Wissenschaft 3/2004, S. 35).

Eine ganz andere Idee, wie Supernovae explodieren könnten, geht auf den englischen Astrophysiker Fred Hoyle und einen amerikanischen Kollegen, den späteren Nobelpreisträger Willy Fowler, zurück. 1960 argumentierten sie, thermonukleare Fusionsreaktionen im dichten Kern eines hoch entwickelten Sterns könnten diesen unter Umständen zerreißen. Die Idee konnte erklären, warum Supernovae so hell sind. Da das Innere solcher Sterne überwiegend aus Kohlenstoff und Sauerstoff besteht, endet die nukleare Fusion beim am stärksten gebundenen Atomkern, der eine gleiche Anzahl von Neutronen und Protonen besitzt: dem radioaktiven Kern ^{56}Ni. Die Energie aus dem radioaktiven Zerfall von Nickel über Kobalt zu Eisen kann die Supernova monatelang zum Leuchten bringen, wie Stirling A. Colgate vom Lawrence Livermore National Laboratory und Chester R. McKee 1969 zeigten.

Heute glauben wir sicher zu sein, dass in der Natur beide Explosionsmechanis- ▷

▷ men vorkommen. Für alle Supernovae vom Typ II ist der Kollaps eines massereichen Sterns zu einem Neutronenstern – oder eventuell zu einem Schwarzen Loch – der Auslöser, und wahrscheinlich gilt dies auch für die weiter unten beschriebenen Supernovae vom Typ Ib und Ic. Der erste Hinweis für die Richtigkeit dieser Hypothese kam 1968 mit der Entdeckung eines schnell rotierenden Neutronensterns im Zentrum des Krebs-Nebels, was Zwicky ja schon dreißig Jahre früher vorhergesagt hatte. Als endgültiger Beweis gilt der Nachweis von Neutrinos – extrem leichten ungeladenen Partikeln –, die von der Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke ausgesandt und in verschiedenen Laboratorien auf der Erde aufgefangen wurden.

Hingegen sind Supernovae vom Typ Ia wahrscheinlich das Ergebnis thermonuklearer Explosionen Weißer Zwerge. Dafür spricht die ausgezeichnete Übereinstimmung der aus Modellen berechneten Spektren und Lichtkurven mit den Beobachtungen. Außerdem lässt sich für einige der historischen Supernovae ausschließen, dass sich im Zentrum der Explosionswolke ein Neutronenstern befindet – auch das ein Hinweis auf eine thermonukleare Explosion. Ende letzten Jahres schließlich wurde im Überrest von Tycho Brahes Supernova der Begleitstern des verschwundenen Weißen Zwergs gefunden. Er entfernt sich jetzt vom Zentrum der Explosion mit genau der Geschwindigkeit, mit der er einst den Weißen Zwerg umkreiste.

IN KÜRZE

▶ Traditionell werden **Supernovae**, die in ihrem Spektrum starke Wasserstoff-Linien aufweisen, als **Typ II** bezeichnet, solche ohne diese Linien als **Typ I**. Letztere unterteilt man heutzutage in drei **Untertypen Ia, Ib und Ic**. Sie ergeben sich großenteils aus den unterschiedlichen Eigenschaften, welche die Hüllen der explodierenden Sterne aufweisen.

▶ Supernovae vom Typ Ia sind **thermonukleare Explosionen Weißer Zwerge**. Hingegen gehen alle anderen Typen aus dem **Gravitationskollaps massereicher Sterne** hervor.

▶ Bei **Hypernovae** wird Gas mit enormer Geschwindigkeit ausgeschleudert. Teils kommt es zu starken Ausbrüchen von Gammastrahlung. In Hypernovae führt der Kollaps vermutlich zur Bildung eines Schwarzen Lochs.

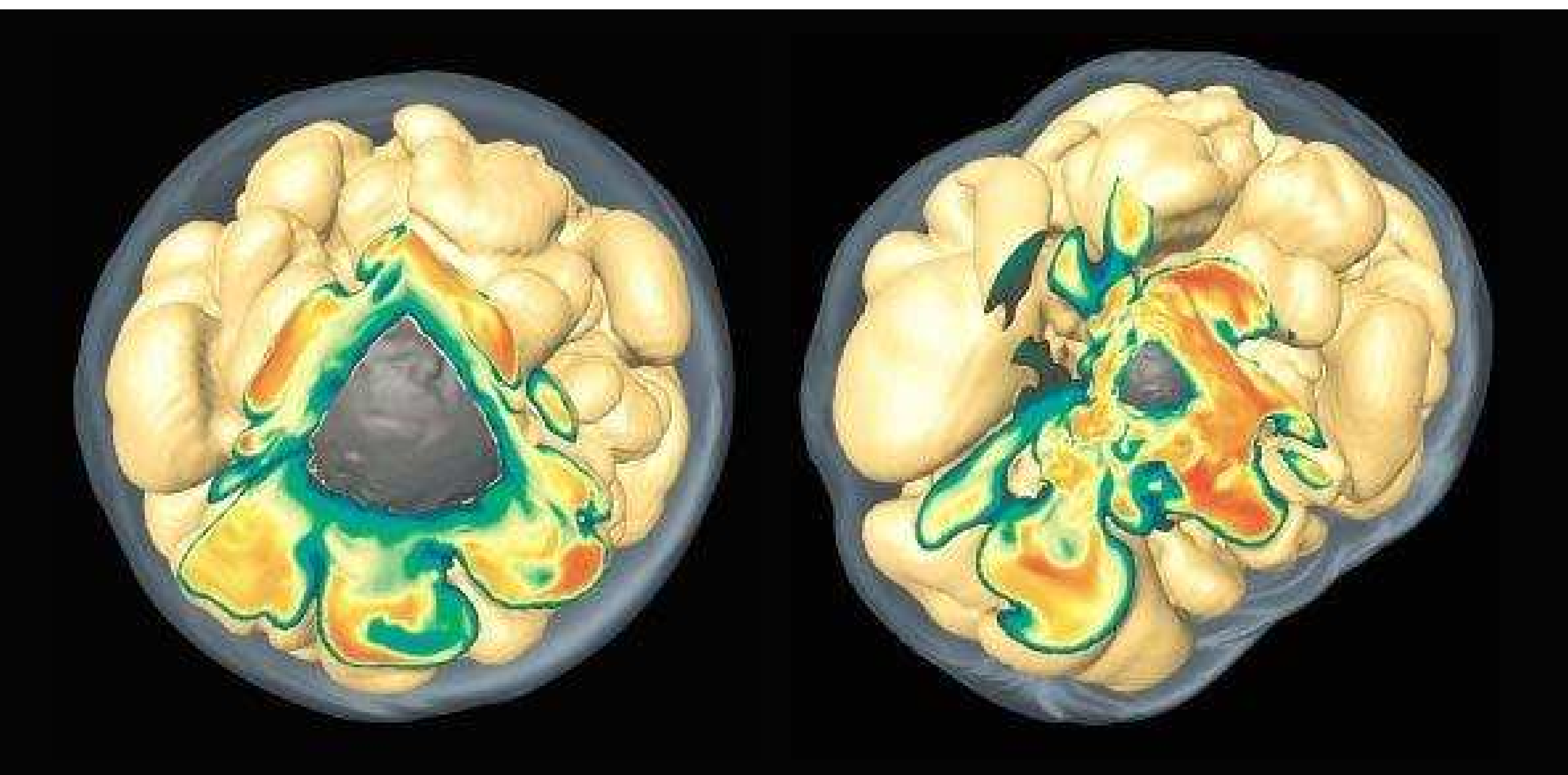
Obwohl alle Beobachtungen die genannten Szenarien stützen, bleibt das Modellieren der Explosionen eine der größten Herausforderungen für Astrophysiker. Seit vielen Jahren werden die schnellsten Computer der Welt mit möglichst realistischen Simulationen gefüttert, aber die Ergebnisse sind meist enttäuschend: Die Modellsterne explodieren im Computer nicht so – wenn überhaupt – wie ihre realen Vorbilder. Erst vor Kurzem hat sich das geändert, und die neuesten Simulationen scheinen der Wirklichkeit immer näher zu kommen.

Standardkerzen für die kosmische Expansion

In den letzten Jahren ist das Interesse der Astronomen an den thermonuklearen Supernovae vom Typ Ia stark gewachsen. Diese Untergruppe enthält die hellsten aller Sternexplosionen, die darüber hinaus auch noch sehr ähnliche Lichtkurven und Spektren aufweisen. Diese Eigenschaft legt den Versuch nahe, sie zur Messung kosmischer Entfernungen zu verwenden – wiederum eine Idee, die Fritz Zwicky zugeschrieben wird.

Im Prinzip ist das Verfahren einfach. Wenn die Helligkeit aller Typ-Ia-Supernovae identisch wäre, ließe sich aus dem Vergleich zwischen der gemessenen scheinbaren Helligkeit und der bekannten Helligkeit am Ort der Supernova ihre Entfernung bestimmen; und weil sie so hell sind, kann man sie auch noch in sehr großer Entfernung sehen und so die Geometrie des gesamten Universums untersuchen.

Leider sind in Wirklichkeit nicht alle Supernovae genau gleich hell. Man muss deshalb ihre Helligkeit eichen, um sie zu »Standardkerzen« zu machen. Hierzu benutzt man eine empirisch gefundene Beziehung zwischen ihrer Helligkeit und der Form ihrer Lichtkurve: Für die helle-



ren Explosionen wird das Licht etwas langsamer schwächer. Mit Hilfe dieser Methode ist es Astronomen gelungen, die Entfernungen von Supernovae zu messen, die explodierten, als das Universum nur etwa halb so alt war wie heute und das Sonnensystem noch nicht einmal entstanden war.

Als man die Daten auswertete, war die Überraschung perfekt: Das heutige Universum scheint beschleunigt zu expandieren – im Widerspruch zum bis dato gültigen kosmologischen Weltbild (siehe »Das Tempo der Expansion« von Adam G. Riess und Michael S. Turner, Spektrum der Wissenschaft 7/2004, S. 42). Sollte sich dieser Befund bestätigen, hätte das Konsequenzen für die gesamte Physik. Das Universum würde heute und auch in Zukunft durch eine neue unbekannte Energieform dominiert, die so genannte Dunkle Energie. Was diese Energie mit negativem Druck ist, ob eine »kosmologische Konstante« – einst von Albert Einstein in die Allgemeine Relativitätstheorie eingeführt und bald wieder verworfen –, die Energiedichte des Quantenvakuums oder ein neues Kraftfeld, für das es noch keine Theorie gibt, ist zu einer der Schlüsselfragen der Physik geworden.

Bevor man jedoch so weit reichende Schlüsse zieht, muss man sicher sein, dass Supernovae auch wirklich als Standardkerzen taugen. Niemand kann zum Beispiel garantieren, dass die weit entfernten Explosionen die gleichen sind wie die, die wir für die Eichung benutzt haben. Darum müssen wir die Explosionen verstehen sowie die Beziehungen, auf denen die Eichung beruht.

Wie erwähnt, erklären Astrophysiker die Typ-Ia-Supernovae als thermonukleare Explosionen Weißer Zwerge. Diese Sterne bestehen zu etwa gleichen Teilen aus Kohlenstoff und Sauerstoff, haben etwa die Masse der Sonne und ein Drittel des Erddurchmessers. Stabil gehalten werden sie durch den Druck eines dichten Gases extrem schneller Elektronen.

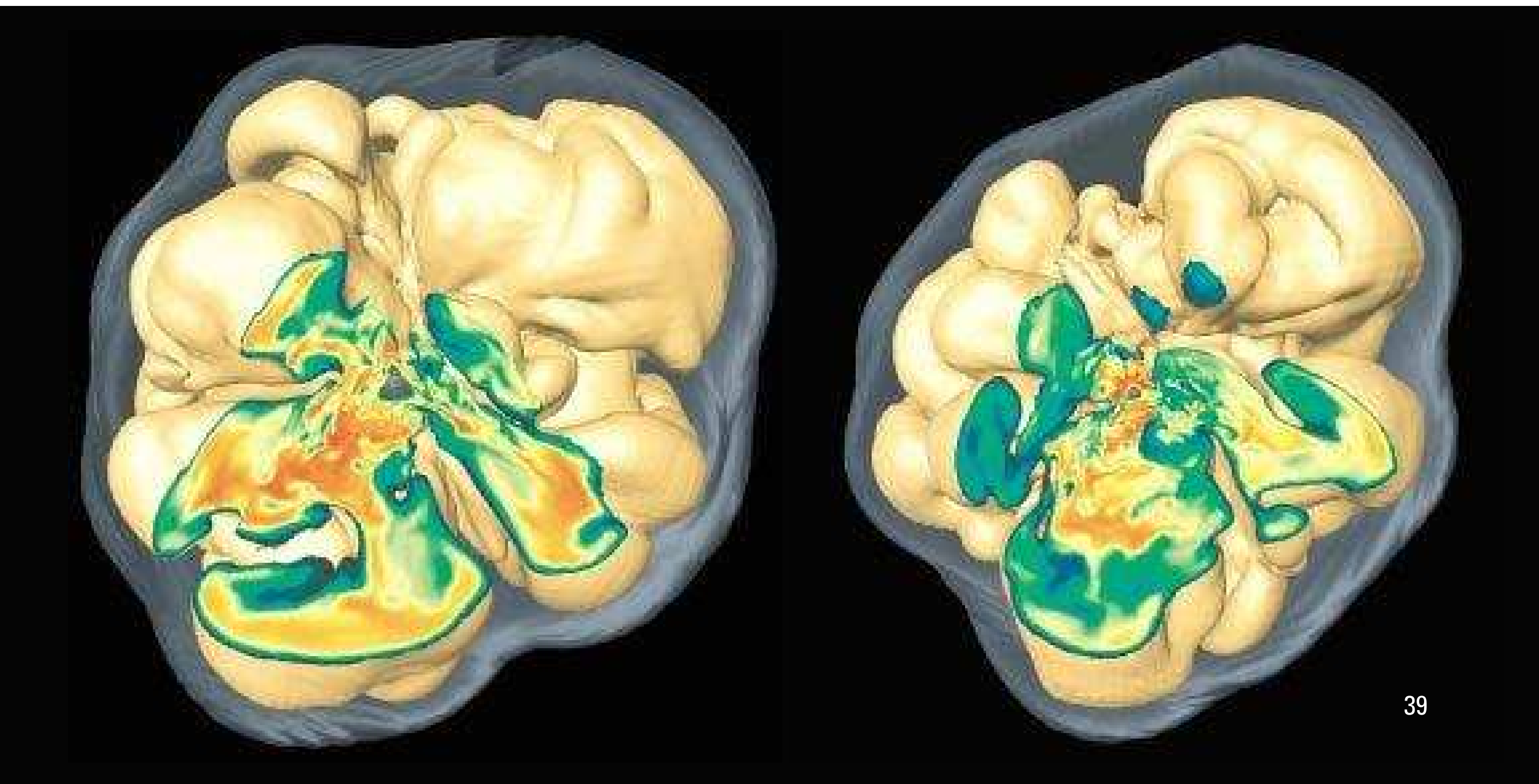
Warum explodieren Weiße Zwerge?

An sich würde ein Weißer Zwerg für alle Zeit in diesem Zustand verharren, denn er verbraucht keine Kernenergie, um stabil zu bleiben. Um aus ihm eine Supernova zu machen, muss es einen nahen Begleitstern geben, von dem Materie zu ihm strömt. Dadurch nimmt die Masse des Weißen Zwergs zu, und er wird zusammengepresst, bis schließlich Dichte und Temperatur die Zündbedingungen für die Fusion von Kohlenstoff und Sauerstoff zu schwereren Elementen erreichen. Eine thermonukleare »Flamme« entsteht; die Fusionsreaktionen laufen in einem winzig kleinen Volumen ab, wahrscheinlich auf den Oberflächen von Blasen bereits »verbrannten« Materials, die tief im Innern des Weißen Zwergs treiben.

In den Spektren von Typ-Ia-Supernovae findet man starke Linien von mittelschweren chemischen Elementen wie Silizium, Schwefel und Kalzium. Demnach schreitet die Fusion nicht immer bis zum am stärksten gebundenen Kern fort. Das bedeutet, dass die Temperatur in Teilen des Sterns einige Milliarden Grad nicht übersteigt – was wiederum ein Indiz dafür ist, dass sich die Flammen zumindest für einige Zeit nicht als überschallschnelle Detonation ausbreiten, sondern langsamer, als so genannte Deflagration. Durch eine Detonation würde fast der gesamte Stern vollständig zu Nickel und Eisen verbrannt, im Widerspruch zu den beobachteten Spektren. Ob die Deflagration letztlich dennoch in eine Detonation übergeht, wird derzeit unter Experten heiß diskutiert.

Eine thermonukleare Flamme, die sich durch Deflagration, das heißt allein durch Wärmediffusion ausbreitet, vermag den Stern nicht zur Explosion zu bringen. Nur ein kleiner Teil würde verbrannt, danach müsste der Stern sich ▷

▼ Wenn massereiche Sterne unter der eigenen Schwerkraft kollabieren, explodieren sie durch so genanntes Neutrinoheizen als Supernovae. Die Simulationsfolge zeigt Anfangsphasen der Explosion. Die von Neutrinos geheizte Schicht um den entstehenden Neutronenstern ist in heftiger Wallung; die expandierenden Blasen von heißem Plasma erscheinen in den Schnittflächen als rote und gelbe Regionen. Die verformte Stoßfront ist als transparente, einhüllende Oberfläche sichtbar. Sie hat nach einer halben Sekunde einen mittleren Radius von 2000 Kilometern erreicht.





LINKS: UNIVERSITY OF MINNESOTA, MECHANICAL ENGINEERING; RECHTS: PAUL E. DIMOTAKIS, GALCIT / CALTECH

Physikalisch betrachtet ähneln manche Vorgänge bei der Kernfusion in einem Weißen Zwerg einer chemischen Verbrennung. Turbulente Flammen – hier Schnappschüsse im Labor – können sich auf zweierlei Weisen ausbreiten: durch Wärmediffusion mit Unterschallgeschwindigkeit (Deflagration) oder durch Verdichtung des Gemischs in einer überschallschnellen Stoßwelle (Detonation). Auf welche dieser Arten ein Weißer Zwerg »verbrennt«, ist eine noch offene Frage.

ausdehnen und abkühlen, und die nuklearen Flammen würden wieder verlöschen. Um den Stern zu zerreißen, muss die Brenngeschwindigkeit einige tausend Kilometer pro Sekunde erreichen statt nur ein paar hundert.

Seit den ersten Versuchen, thermonukleare Supernovae auf Computern zu simulieren, hat dieses Problem die meisten Schwierigkeiten bereitet. Dabei war die Lösung eigentlich bekannt, und zwar vom Automotor. Das Zauberwort heißt Turbulenz. Auch Autos würden ohne Turbulenz nicht fahren. Sie vergrößert bei vorgemischten Flammen deren Oberfläche durch Falten und Dehnen. Daher wächst die Verbrennungsrate, die proportional zur Flammenoberfläche ist, stark an. Nur aus diesem Grund kann ein Automotor mit einigen tausend Umdrehungen pro Minute laufen.

Lassen sich physikalische Konzepte und numerische Methoden aus der technischen Verbrennung tatsächlich auf Supernova-Explosionen übertragen? Diese Frage ist in den letzten Jahren von einer Gruppe am Max-Planck-Institut (MPI) für Astrophysik in Garching sowie von Teams an der University of California und der University of Chicago weit gehend beantwortet worden. Wie in der Verbrennungsforschung lassen sich auch in Supernovae nur die großen Längenmaßstäbe direkt simulieren; die nicht aufgelösten kleinräumigen Prozesse müssen modelliert werden. Dieses Problem ist aus der Meteorologie vertraut: Man kann nicht gleichzeitig einen Ozean und einen Berg numerisch »auflösen«.

In Sekunden zerreißt der Stern

Solche Simulationen müssen in drei Raumdimensionen durchgeführt werden und sind dadurch extrem umständlich – denn Turbulenz ist nur in drei Raumdimensionen korrekt zu beschreiben. Die bislang aufwändigste Serie von Simulationen wurde kürzlich auf dem IBM-Supercomputer am Rechenzentrum des MPI in Garching durchgeführt.

Jede Simulation benutzte 512^3 Gitterpunkte zur Beschreibung des Sterns, wodurch Längen bis hinunter zu wenigen Kilometern aufgelöst wurden. Der Speicherbedarf betrug zehn Gigabyte und die Rechenzeit rund 15 000 Prozessorstunden pro Simulation. In gewissem Sinn waren die Simulationen parameterfrei: Nur physikalische Parameter wie die chemische Zusammensetzung und die Zündbedingungen wurden variiert; sie sind aber auch in der Natur von Supernova zu Supernova verschieden.

Eine typische Simulationsfolge zeigt die pilzartigen Strukturen der thermonuklearen Brennfront, wie sie auch von aufsteigenden heißen Gasblasen in einer Flüssigkeit bekannt sind (siehe die Bilder auf der ersten Doppelseite). Man sieht, wie im Verlauf der Explosion auf den Oberflächen der Blasen durch Turbulenz kleinräumige Strukturen entstehen.

Demnach war unsere Vermutung richtig. Das Anwachsen der Fusionsrate durch Turbulenz reicht aus, den Weißen Zwerg in wenigen Sekunden zu zerreißen. Die »Asche« der thermonuklearen Flammen expandiert mit einer Geschwindigkeit von mehr als 10 000 Kilometern pro Sekunde – in guter Übereinstimmung mit Supernova-Beobachtungen.

Dennoch bleiben viele offene Fragen. Wie sich ein Weißer Zwerg bis zum Zünden der nuklearen Fusion entwickelt, ist noch weit gehend unbekannt. In unseren Simulationen wurde der Anfang der Explosion etwas willkürlich eingeleitet. Auch die Physik der turbulenten Verbrennung unter extremen Bedingungen mag noch Überraschungen bereithalten. In der Tat gibt es aus Supernova-Daten Hinweise, dass das hier gezeichnete Bild noch unvollständig ist. Die bisherigen reinen Deflagrationsmodelle besagen, dass ein beträchtlicher Teil der Materie des Weißen Zwergs unverbrannt in den Raum geschleudert würde. Diesen Kohlenstoff und Sauerstoff sollte man spätestens nach einem Jahr in den Spektren sehen – aber man findet nichts davon. Zudem liegen die Explosionsenergien und



Helligkeiten der Modellsupernovae zwar im Bereich der Beobachtungen, aber doch etwas auf der niedrigen Seite. Und schließlich wissen wir immer noch nicht, woher die Unterschiede zwischen verschiedenen Typ-Ia-Supernovae kommen – und das war einer der Ausgangspunkte für die Simulationen.

Die Supernova-Explosionen massereicher Sterne zeigen wesentlich größere Unterschiede als die thermonuklearen Supernovae. Je mehr Beobachtungen hinzukommen und je besser wir diese Ereignisse verstehen, desto mehr Vielfalt entdecken wir.

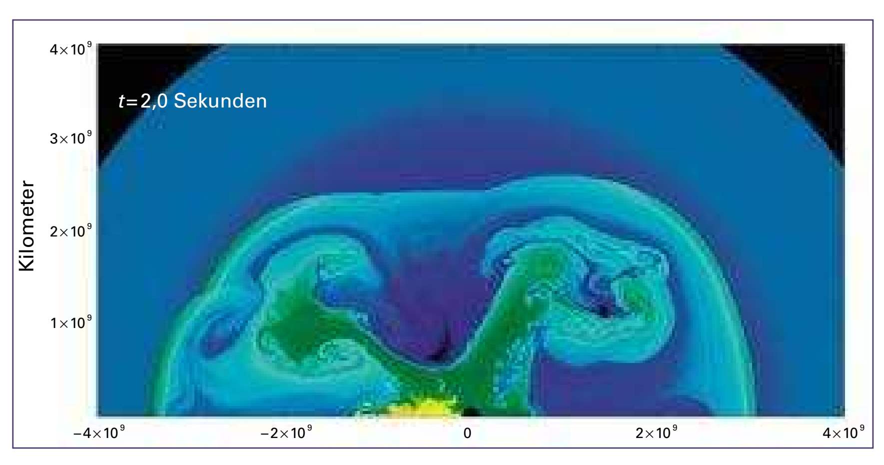
Verräterische Spektrallinien

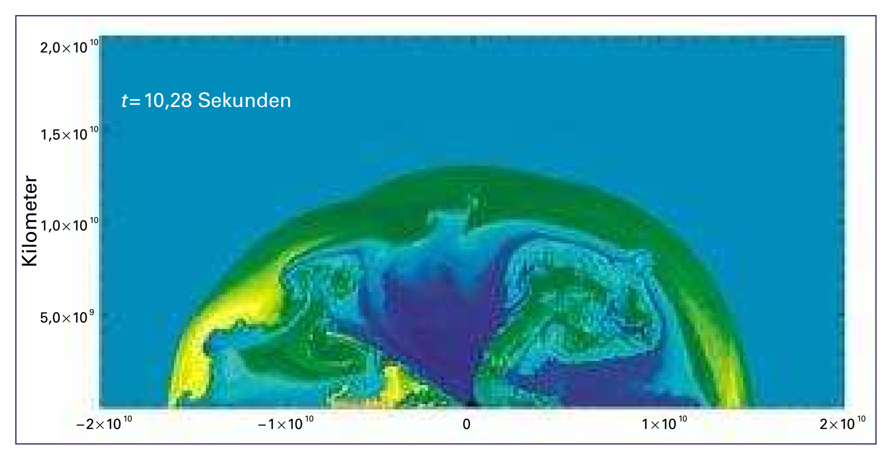
Die Eigenschaften des explodierenden Sterns bestimmen, wie hell eine Supernova ist und welche atomaren Linien in ihrem Strahlungsspektrum aufscheinen. Der Vorläuferstern ist aber nur bei Supernova 1987A und in wenigen anderen Fällen bekannt. Dennoch können Forscher aus der beobachteten Strahlung Rückschlüsse auf die bei der Explosion ausgeschleuderte Materiemenge und die Explosionsenergie ziehen. Auch geben die Spektren Aufschluss über die während der Explosion entstehenden chemischen Elemente.

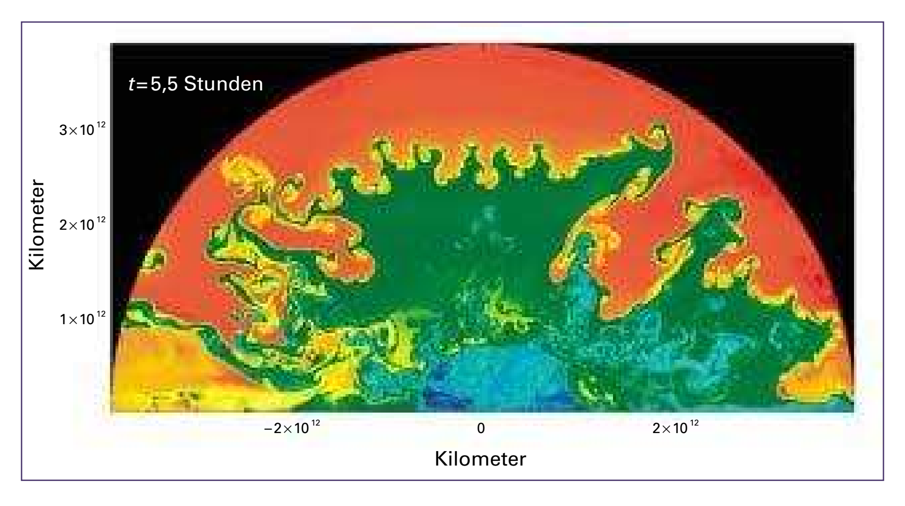
Wenn im Spektrum starke Wasserstofflinien auftauchen, dann hatte der explodierende Stern eine dicke Wasserstoffhülle. Die Astronomen sprechen dann von einer Typ-II-Supernova. Solche Ereignisse sind normalerweise sehr hell. Aber massereiche Sterne können ihre äußeren Schichten durch Sternwinde oder durch den Einfluss eines nahen Begleitsterns eingebüßt haben. In diesem Fall fehlen Spektrallinien von Wasserstoff, möglicherweise auch von Helium; das klassifiziert die Ereignisse als Supernovae vom Typ Ib oder Ic. Die Unterklassen tragen der Tatsache Rechnung, dass die Helligkeitsentwicklung einer Supernova je nach verbliebener Hüllenmasse unterschiedlich sein kann.

In seltenen Fällen werden extreme Expansionsgeschwindigkeiten und bisweilen sehr hohe Leuchtkräfte gemessen. Die Explosionsenergien können dabei bis zu zehnmal höher liegen als bei gewöhnlichen Supernovae. Solche »Hypernovae« sind zumindest in einigen Fällen mit so genannten kosmischen Gammastrahlungsblitzen verknüpft.

Gammablitze wurden bereits in den 1960er Jahren entdeckt, doch ihre Quellen blieben über dreißig Jahre lang rätselhaft. Erst in den späten 1990er Jahren gelangen genauere Ortsbestimmungen am Himmel, und dadurch wurden auch schnelle Beobachtungen bei anderen Wellenlängen möglich. Dabei entdeckten die Forscher ein »Nachglühen« der Quellen bei Radiofrequenzen sowie im sichtbaren und im Röntgenbereich. Die endgültige Aufklärung des Rätsels glück- ▷







Die großen aufsteigenden Blasen aus neutrinogeheiztem Gas führen zu einer unsymmetrischen Explosion und vermischen chemisch unterschiedliche Sternschichten. Die zweidimensionale Computersimulation zeigt drei Schnappschüsse: zwei Sekunden, zehn Sekunden und fünfeinhalb Stunden nach Explosionsbeginn. Zu diesen Zeiten hat die Stoßfront Radien von 30000, 150000 und 30 Millionen Kilometern erreicht. Im unteren Bild bedeutet Rot Wasserstoff, Grün Helium; die blauen Regionen enthalten hauptsächlich schwerere Elemente, die nahe dem Zentrum der Explosion entstanden sind.

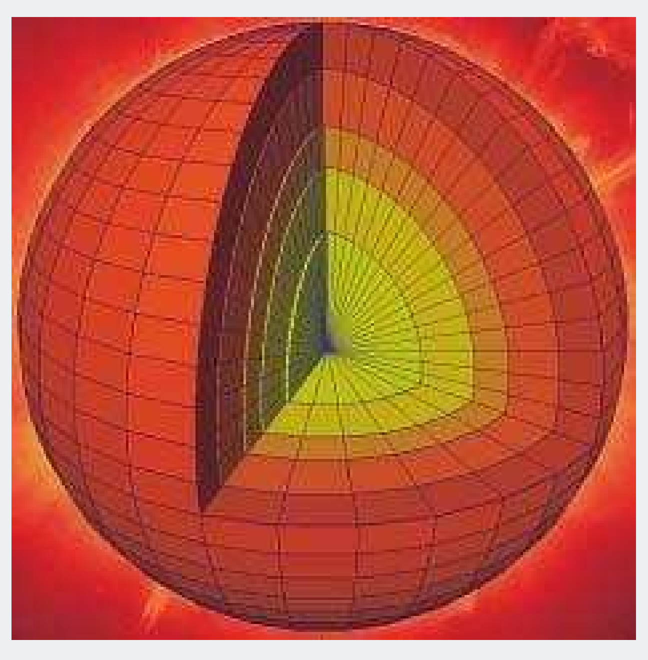
Asymmetrische Sternexplosionen – im Computer schwer zu simulieren

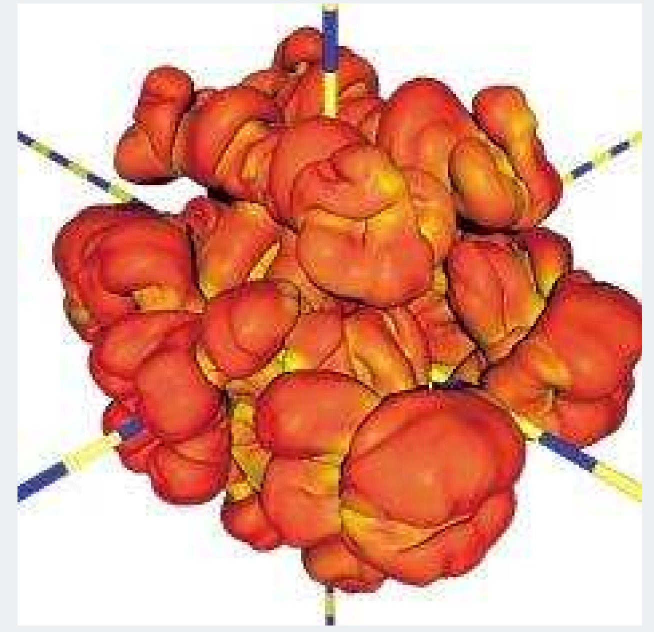
Für Simulationsrechnungen wird der Stern in verschiedene Zellen zerlegt (links) und seine Entwicklung durch eine Folge von »diskreten« Zeitschritten verfolgt. In jeder Zelle und für jeden Zeitschritt wird die Änderung physikalischer Größen wie Dichte und Temperatur aus hydrodynamischen Gleichungen berechnet.

Das Modell ist umso genauer, je mehr Zellen zur Beschreibung der Supernova verwendet werden – doch damit steigt auch der Rechenaufwand. Die Anforderungen an Rechengeschwindigkeit und Speicherplatz sind enorm: Eine detaillierte Simulation umfasst etwa 10^{20} Fließkommaoperationen und benötigt bis zu mehreren Terabyte (10^{12} Byte) an Speicherplatz. Selbst die heutzutage schnellsten Rechner mit mehreren tausend Einzelprozessoren vermögen nur etwa 10^{12} Fließkommaoperationen pro Sekunde durchzuführen. Das heißt, ein solcher Superrechner müsste einige Jahre ununterbrochen arbeiten, um eine einzige detaillierte Supernova-Simulation durchzuführen.

Hinzu kommt, dass bei Sternexplosionen Längen- und Zeitmaßstäbe zu modellieren sind, die sich über einen Größenordnungsbereich von zehn Millionen erstrecken. Die Turbulenz der Strömung gestattet keine vereinfachenden Symmetrieannahmen, und die physikalischen Prozesse – thermonukleare Brennvorgänge, Transport von Neutrinos, Eigenschaften der Materie bei extremen Dichten und Temperaturen – sind ungeheuer komplex.

In einem Supernova-Modell, das keinerlei räumliche Symmetrie aufweist, hängen alle Strömungsgrößen – beispielsweise die Dichte – von allen drei Raumkoordinaten und der Zeit ab (rechts). Will man auch noch den Transport von Neutrinos modellieren, wird dieses vierdimensionale Strömungsproblem zu einem siebendimensionalen. Denn in jeder diskreten Zelle des Modells hängen die Größen, die den Transport der Neutrinos bestimmen – zum Beispiel der Fluss der Neutrinos –, von der Energie und der Bewegungsrichtung der Neutrinos ab, wobei Letztere durch zwei Winkelkoordinaten gegeben ist. Außerdem ist noch zu beachten, dass der Transport dreifach, nämlich für drei in der Natur vorkommende Neutrinosorten, berechnet werden muss.





▷ te schließlich mit der Beobachtung des Gammablitzes GRB030329 vom 29. März 2003. Er war nicht nur einer der bislang hellsten und nächstgelegenen, sondern ereignete sich auch gleichzeitig und an gleicher Stelle wie die ungewöhnliche Supernova SN 2003dh. Dadurch wurde zweifelsfrei ein Zusammenhang zwischen dem Tod massereicher Sterne und zumindest einigen Gammablitzen bestätigt. Vermutlich besitzen diese sterbenden Sterne so große Kerne aus Eisen, dass beim Kollaps Schwarze Löcher statt Neutronensterne entstehen.

Generationen von massereichen Sternen haben das Universum mit Kohlenstoff, Sauerstoff, Silizium und Eisen angereichert und so unter anderem die Entstehung von Planeten und Leben ermöglicht. Sie spielen daher eine zentrale Rolle im kosmischen Kreislauf von Werden und Vergehen.

Brutstätten schwerer Elemente

In vielen Millionen Jahren ruhiger Entwicklung erbrütet ein massereicher Stern diese schweren chemischen Elemente aus Wasserstoff und Helium, die im Urknall gebildet wurden. Zum Zeitpunkt seines Kollapses ist der stellare Kern aus Eisen von zwiebelartigen Schalen umgeben, welche die Asche früherer nuklearer Brennphasen enthalten. Wenn die Supernova die Sternhülle absprengt, schleudert sie diese Elemente in den interstellaren Raum – vermengt mit radioaktivem Material, das dem Höllenfeuer der Explosion entstammt.

Supernovae sind auch die besten Kandidaten für den immer noch mysteriösen Ursprung der schwersten Elemente. Gold, Blei, Thorium und Uran kön-

nen nur unter ganz besonderen Bedingungen entstehen. Noch weiß niemand, ob solche Bedingungen im Innern einer Supernova herrschen.

Schon die Suche nach dem Grund für die Explosion massereicher Sterne erwies sich als unvermutet schwierig. Wie kommt es dazu, dass die äußeren Schichten eines Sterns abgesprengt werden, während sein Kern zu einem Neutronenstern oder Schwarzen Loch kollabiert? Obwohl die zu Grunde liegende Idee einfach klingt – gravitative Bindungsenergie wird freigesetzt und treibt die Explosion an –, sind die Details äußerst kompliziert.

Neutrinos heizen ein

Wie schafft es der zusammenstürzende Stern, die Implosion in eine Explosion umzukehren? Wie vermag die kollabierte Materie sich aus den Fesseln der Schwerkraft zu befreien? Eigentlich ist dafür genügend Energie vorhanden: rund hundert Mal mehr als zur Explosion benötigt. Aber diese Energie wird beinahe vollständig in Form extrem flüchtiger Neutrinos abgestrahlt, die bei den hohen Dichten und Temperaturen im Neutronenstern in riesiger Zahl entstehen. Der Mechanismus, der einen kleinen Teil dieser Energie für die Explosion nutzbar macht, harrt seit mehr als vierzig Jahren seiner Entdeckung. Das ist das notorische »Supernova-Problem«.

Obwohl es den Theoretikern nicht an Ideen mangelte, erwiesen sich alle bisherigen Vorschläge als unzureichend. Der wachsende Zoo von Supernovae mit schwachen, energiereichen und sogar hyperenergetischen Ereignissen besagt, dass die erfinderische Natur offenbar mehr als einen Weg gefunden hat, dieses Problem zu lösen. In kollabierenden Sternen stehen die unterschiedlichsten Prozesse im Wettstreit – einige für die Explosion hilfreich, andere hinderlich. Insbesondere gilt es, Modelle für die Wechselwirkungen der Neutrinos in dichter Supernova-Materie zu entwickeln.

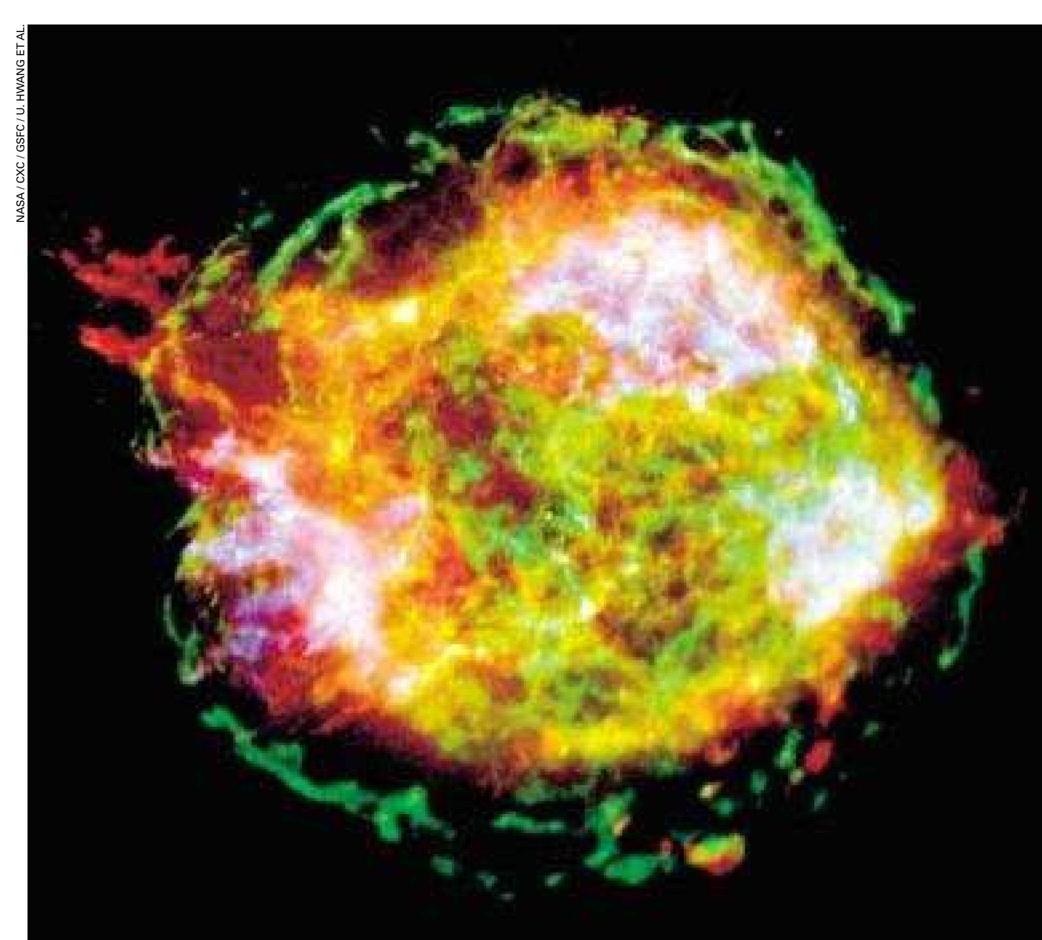
In einer Pionierarbeit schlugen Stirling A. Colgate und Richard White vom Lawrence Livermore National Laboratory bereits 1966 vor, Neutrinos aus dem heißen Neutronenstern könnten die Energie liefern, mit der die äußeren Schichten des explodierenden Sterns abgesprengt werden. Die ersten Supernova-Modelle, in denen dieser Effekt auftauchte, wurden in den 1980er Jahren von Jim Wilson am Lawrence Livermore National Laboratory berechnet. Hans Bethe und Jim Wilson zeigten danach, dass rund zehn Prozent der vom Neutronenstern abgestrahlten Neutrinos hinter der Supernova-Stoßfront absorbiert werden und dort die Materie aufheizen.

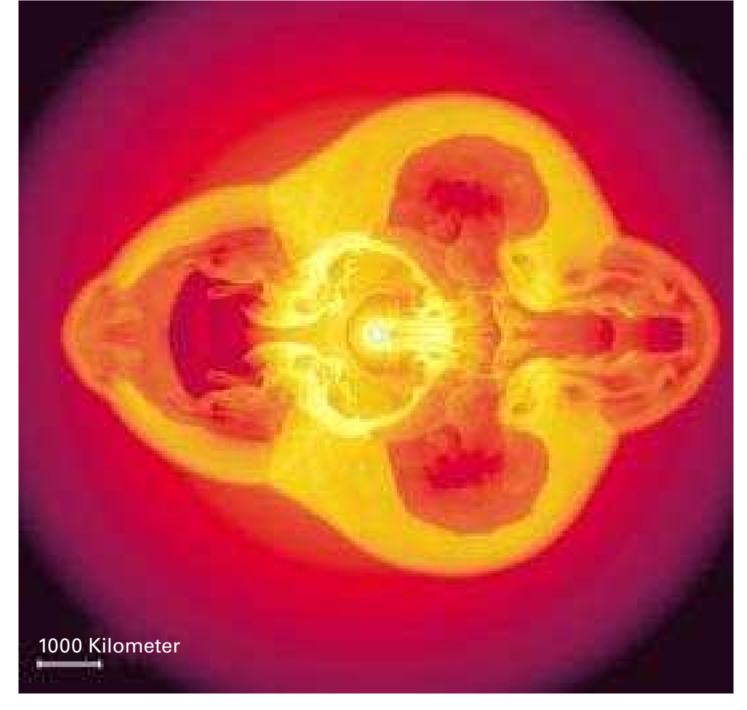
Aber reicht dieser Energieübertrag aus, den stagnierenden Stoß wieder zu beleben und eine verzögerte Explosion auszulösen? Sehr genaue Computerberechnungen des Energietransports durch Neutrinos offenbaren ein ernsthaftes Problem. Das diskutierte Szenario reagiert höchst empfindlich auf zwei gegenläufige Einflüsse: einerseits das Neutrinoheizen und andererseits den Energieverlust durch Neutrino-Emission in der kollabierenden Materie. Für Vorläufersterne mit mehr als zehn Sonnenmassen sind diese Energieverluste so gravierend, dass der neutrinogetriebene Explosionsmechanismus nicht funktioniert.

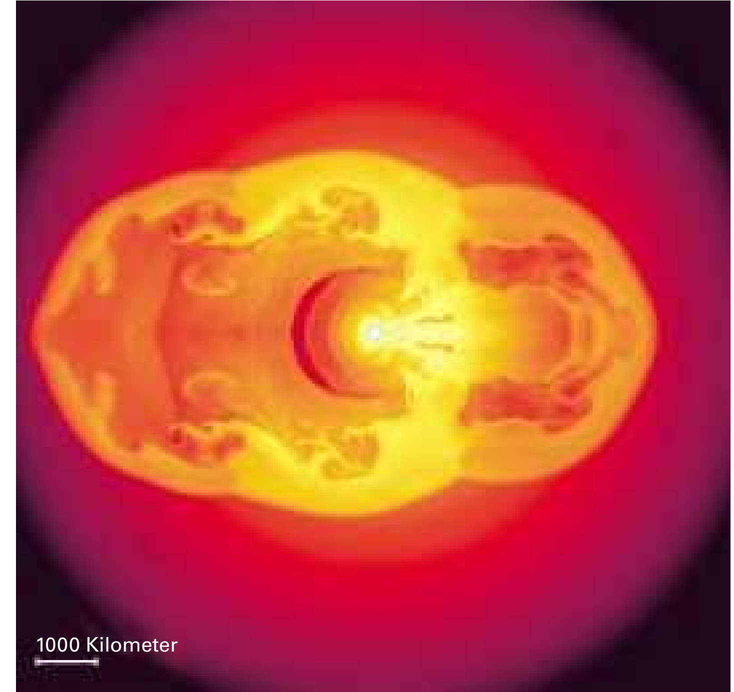
Doch die Modelle beruhen auf einer radikalen Vereinfachung: Der Stern wird als kugelsymmetrisch betrachtet, das heißt, in allen Richtungen sollen dieselben Bedingungen gelten. Damit werden aber wichtige mehrdimensionale Phänomene ignoriert, beispielsweise Konvektion und Rotation. Beobachtungen von Supernovae und deren Überresten liefern viele Hinweise, dass die Zwiebelschalenstruktur des Supernova-Vorläufers bei der Explosion zerstört wird. Die Trümmer der Sternhülle expandieren unterschiedlich schnell, und die während der Explosion gebildeten Elemente sind ungleichmäßig verteilt. In der Supernova 1987A wurden sie in der Wasserstoff- und Heliumschale entdeckt, mit unerwartet hohen Geschwindigkeiten.

In den ersten mehrdimensionalen Simulationen zeigte sich dann, dass die von Neutrinos geheizte Region im Zentrum einer Supernova von starken konvektiven Strömungen umgewühlt wird, ähnlich heftig kochendem Wasser in einem Topf. Es entwickeln sich pilzförmige Blasen, in denen heißes Plasma aufsteigt. ▷

▼ Cassiopeia A ist der Überrest eines massereichen Sterns, der vor rund 320 Jahren als Supernova explodierte. Die Stoßwelle erscheint als äußerer grüner Ring. Ihr Durchmesser beträgt etwa zehn Lichtjahre. Rot, Grün und Blau bedeuten Röntgenstrahlen niedriger, mittlerer und hoher Energie – was unterschiedliche Konzentrationen von Silizium und Eisen im ausgeschleuderten Gas kennzeichnet. Die hellen, blauen, fingerartigen Strukturen nahe der Stoßwelle bestehen fast vollständig aus Eisen.


NASA / CXC / GSFC / U. HWANG ET AL.





In zweidimensionalen Simulationen wachsen zufällige Anfangsstörungen in der ersten Sekunde der Explosion zu höchst unterschiedlichen Strömungsmustern des expandierenden Gases an. Wenn Supernovae stark richtungsabhängig explodieren, kann der resultierende Neutronenstern einen Rückstoß von mehr als 1000 Kilometer pro Sekunde erleiden. Stark gerichtete Explosionen erzeugen Rückstoßgeschwindigkeiten von mehr als 300, weniger richtungsabhängige von nicht mehr als 200 Kilometer pro Sekunde. Tatsächlich beobachten Astronomen Pulsare – rotierende Neutronensterne –, die sich mit solch unterschiedlichen Geschwindigkeiten am Himmel bewegen.

▷ Dabei wird die Energie, die das Gas von den Neutrinos aufgenommen hat, zur Supernova-Stoßfront transportiert. Der dort wachsende Druck schiebt den Stoß weiter nach außen und verursacht selbst dann eine Explosion, wenn kugelsymmetrische Modelle versagen. Simulationen in drei Raumdimensionen, die Christopher Fryer und Michael Warren am Los Alamos National Laboratory und nun auch unsere Supernova-Gruppe am MPI für Astrophysik in Garching durchführten, bestätigen den hilfreichen Einfluss der Konvektion (siehe die Bildfolge auf der Doppelseite 38/39).

Wie unsere Simulationen zeigen, wachsen anfänglich kleine Blasen aus neutrinogeheiztem expandierendem Gas zu immer größeren Strukturen, die sich, falls die Explosion hinreichend langsam einsetzt, miteinander vereinigen können. Aus vielen kleinen Zellen, die durch trichterartige Ströme kühlerer, zum Neutronenstern stürzender Materie getrennt sind, entstehen einige heiße Blasen, umgeben von absinkendem kühlerem Gas.

Die Expansion dieser neutrinogeheizten Blasen führt zu einer asymmetrischen Explosion, in deren Verlauf die räumliche Verteilung des Eisens und verwandter Elemente stark richtungsabhängig wird. Die Inhomogenitäten, die aus der ersten Sekunde der Explosion stammen, regen zunächst Strömungsinstabilitäten an und letztlich eine großräumige Durchmischung in den äußeren Schichten der ausgeschleuderten Sternhülle (siehe Bilder S. 41). Hierdurch werden schwere Elemente und Helium in die Wasserstoffhülle und gleichzeitig Wasserstoff in tiefere Schichten verfrachtet. Das Resultat ähnelt den Röntgenbildern des 300 Jahre alten Supernova-Überrests Cassiopeia A.

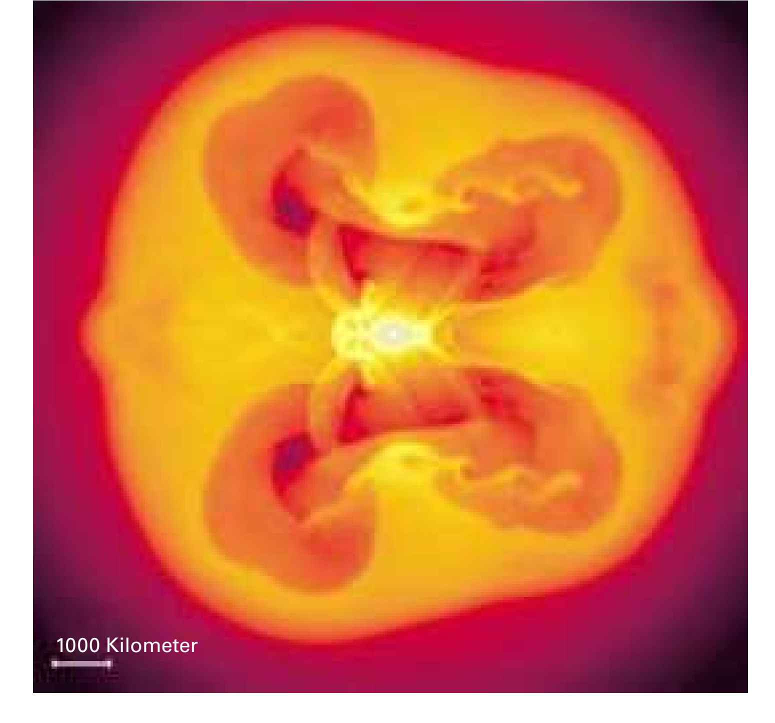
Zweierlei rasende Pulsare

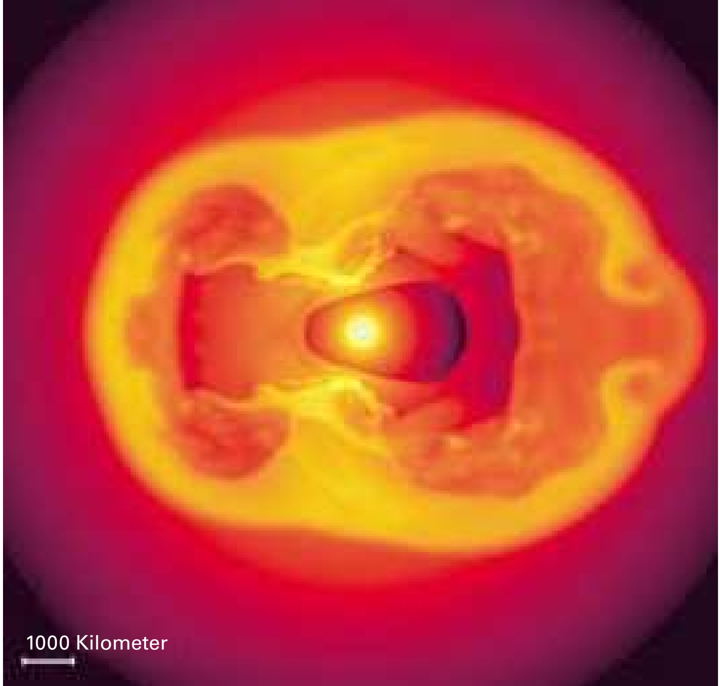
Eine Folge der großen Wucht, mit der die Sternmaterie in eine Vorzugsrichtung weggeschleudert wird, ist ein Rückstoß, den der Neutronenstern in die entgegengesetzte Richtung erleidet. In einer Serie von zweidimensionalen Simulationen fand das Team am MPI für Astrophysik Rückstoßgeschwindigkeiten der Neutronensterne von bis zu 1000 Kilometern pro Sekunde. Das passt gut zu den beobachteten Bewegungen der meisten Pulsare – rotierender Neutronensterne – durch den interstellaren Raum.

Genau genommen beobachtet man eine Gruppe von vergleichsweise langsamen sowie eine zweite Population von schnellen Pulsaren. Das hier skizzierte Szenario legt nahe, dass die langsame Gruppe mit dem Auftreten vieler relativ kleiner konvektiver Strukturen verknüpft ist, während hohe Geschwindigkeiten entstehen, wenn in der konvektiven Schicht um den Neutronenstern wenige große Strukturen dominieren. Somit zeichnet sich ein einheitliches Bild ab, das viele Supernova-Eigenschaften aus einem gemeinsamen Ursprung erklärt.

Doch all diese Modelle haben noch schwer wiegende Mängel. Nur durch bessere Simulationen in mehreren Raumdimensionen wird das Supernova-Problem zu lösen sein. Große Kollaborationen in den USA – die TeraScale Supernova Initiative und das SciDAC Supernova Science Center, beide vom Department of Energy gefördert – stehen dabei im Wettstreit mit Gruppen am MPI für Astrophysik sowie in Japan.

Der Rechenaufwand ist enorm. Wenn Neutrinos durch einen Stern ohne einschränkende Symmetrien strömen, handelt es sich um ein siebendimensionales Problem (siehe Kasten auf der vorigen Doppelseite). Während bei hohen Dichten Neutrinos stark an das bewegte stellare Gas gekoppelt sind, beginnen sie sich mit wachsendem Abstand vom Zentrum allmählich ungehindert auszubreiten. Die Entwicklung der Supernova muss dabei über viele hunderttausend Zeitschritte verfolgt werden, wofür gut 10^{20} Rechenoperationen nötig sind. Kein heute existierender Supercomputer vermag eine solche Zahl von Operationen in vernünftiger Zeit zu bewältigen. Selbst Rechner der nächsten Generation





werden eine Aufgabe von diesem Umfang erst anpacken können, wenn neuartige Programme entwickelt werden.

Ein erster Schritt in diese Richtung gelang kürzlich am MPI für Astrophysik. Dort wurden erstmals mehrdimensionale Simulationen durchgeführt, bei denen der Transport der Neutrinos in Abhängigkeit von der Energie behandelt wird. Obwohl die Modelle nach wie vor Achsensymmetrie besitzen, berücksichtigt der Transport fünf Dimensionen: die Zeit, den Abstand vom Zentrum, einen Raumwinkel, einen Winkel zur Beschreibung der Neutrinorichtung sowie die Neutrinoenergie. Jedes Modell erfordert weit mehr als 10^{17} Fließkommaoperationen – vergleichbar mit den größten Strömungssimulationen, die in der Astrophysik heute möglich sind.

Viele Wege zur Explosion

Diese bislang besten Computerrechnungen bestätigen, wie außerordentlich empfindlich die Supernova-Dynamik auf die Behandlung der Neutrinos reagiert. Außerdem beginnt sich die stagnierende Stoßfront zu verbiegen, die bevorzugt Beulen in Achsenrichtung entwickelt. Dies unterstreicht, dass letztlich Modelle nötig sein werden, die ohne einschränkende Symmetrieannahmen auskommen.

Die wachsende Vielfalt von Supernovae-Beobachtungen deutet an, dass es mehr als einen Explosionsmechanismus geben könnte. So wurden Magnetfeldeffekte vorgeschlagen, die gleichsam die Rotationsenergie eines schnell rotierenden Neutronensterns anzapfen. Dabei wird das Magnetfeld, das einen kollabierten stellaren Kern durchzieht, durch Aufwickeln der Kraftlinien verstärkt und drückt Materie gewaltsam in zwei polaren Gasströmen – so genannten Jets – nach außen. Auf diese Weise wird die Explosion stark richtungsabhängig. In Vorläufersternen gewöhnlicher Supernovae sind Rotation und Magnetfelder vermutlich zu schwach, sodass dieser Effekt keine Rolle spielt. Hypernovae hingegen zeigen Hinweise auf starke Abweichungen von der Kugelgestalt und haben höhere Explosionsenergien, als sich durch Neutrinoheizen allein erklären ließe.

Insbesondere Gammablitze scheinen von extrem gebündelten Gasströmungen zu stammen, die sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Diese relativistischen Jets verlieren ihre Bewegungsenergie in Teilchenstößen und erzeugen dabei intensive Gammastrahlung.

Der nun durch Beobachtungen erhärtete Zusammenhang mit dem Tod massereicher Sterne war bereits von Stan Woosley von der University of California in Santa Cruz vorhergesagt worden. Sein »Kollapsar«–Modell nimmt an, dass beim Kollaps eines sehr schnell rotierenden massereichen Sterns im Zentrum ein Schwarzes Loch entsteht. Es verschlingt anschließend das Gas aus der Sternhülle, das sich wegen der schnellen Rotation zunächst in einem ringförmigen Wulst um das Schwarze Loch ansammelt. Bei dieser Akkretion des Gases werden riesige Energien freigesetzt und zwei gebündelte Jets erzeugt, die sich fast lichtschnell längs der Rotationsachse des Schwarzen Lochs ausbreiten. Sie durchdringen alle Sternschichten und erzeugen dann weit außerhalb den Gammablitz. In der Nähe des Schwarzen Lochs entstehen außerdem gewaltige Mengen an radioaktivem Nickel. Die dabei frei werdende Energie zersprengt die Sternhülle in einer Hypernova-Explosion.

Überraschende Beobachtungen haben uns Hand in Hand mit raffinierten Computersimulationen eine ungeahnte Vielfalt von Supernova-Phänomenen eröffnet. In diesem ständig wachsenden Puzzle müssen viele Teile noch ihren endgültigen Platz finden. Die Astrophysiker haben erst begonnen, mit immer besseren Modellen zahlreiche Möglichkeiten auszuloten; für kommende Generationen bleibt also noch viel zu tun. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE





Wolfgang Hillebrandt kam 1978 an das Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching, wo er seit 1997 einer der Direktoren ist. Seine Hauptarbeitsgebiete sind Nuklear- und Teilchen-Astrophysik, Sternentwicklung und Supernova-Explosionen. **Hans-Thomas Janka** erforscht in Garching Neutrino-Astrophysik, Neutronensterne und kosmische Gammablitze. **Ewald Müller** ist Forschungsgruppenleiter in Garching. Sein Spezialgebiet ist die numerische Simulation relativistischer Phänomene in der Astrophysik.

Supernovae vom Typ Ia. Von W. Hillebrandt und F. Röpke in: Sterne und Weltraum, S. 22, 5/2005

Supernovae im Superrechner. Von W. Hillebrandt und E. Müller in: Physik Journal, S. 49, Mai 2004

Wenn Sterne explodieren: Die Theorie von Supernovae. Von H.-T. Janka und E. Müller in: Physik in unserer Zeit, Bd. 32, S. 202, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

BILDGEBUNG FÜR MEDIZINISCHE ZWECKE

Ein Blick ins Innere des Körpers

Verfahren der Bildgebung zeigen Gewebe und Organe ohne chirurgischen Eingriff.

Tomografen sind heute nicht mehr aus der medizinischen Diagnostik wegzudenken. Mancher chirurgische Eingriff wurde dadurch schon obsolet, mancher Tumor frühzeitig entdeckt oder so gut lokalisiert, dass man ihn behandeln konnte. Eine Kombination aus Hardware und Algorithmen liefert die Schnittbilder (Tomogramme) durch den Körper, aus denen Computer räumliche Darstellungen von Organen errechnen.

Drei Verfahren stehen dem Arzt grundsätzlich zur Verfügung. Das älteste, die Computertomografie (CT), nutzt die unterschiedliche Durchlässigkeit der Gewebearten für Röntgenstrahlen. Halbkreisförmig angebrachte Detektoren messen die Restenergie eines fächerförmigen Strahls, dessen Quelle in kleinen Schritten um den Körper fährt. Das ermöglicht die Rekonstruktion der Gewebeverteilung in Schichten von einem bis acht Millimeter Dicke. Eine Kopfuntersuchung dauert etwa zehn, die Erfassung des Unterleibs rund dreißig Minuten. Bei so genannten Spiral-CT-Geräten läuft die Röntgenquelle auf einer Spiralbahn um den Patienten, der kontinuierlich weiterbewegt wird. Die Aufnahmen erfolgen in Sekundenschnelle, sodass Atembewegungen die Messungen nicht mehr stören.

Hinweis auf neurologische Erkrankungen

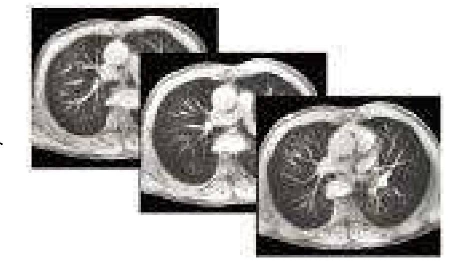
Das jüngste Mitglied der Tomografen-Familie ist die Positronen-Emissionstomografie (PET). Der Arzt spritzt dem Patienten radioaktiv markierte Verbindungen, die bei Stoffwechselprozessen eine Rolle spielen. Das Besondere: Beim Zerfall der verwendeten Isotope entstehen Positronen, die Antiteilchen der Elektronen. Treffen Teilchen und Antiteilchen aufeinander, vernichten sie sich. Dabei werden zwei Photonen (Gammaquanten) einer bestimmten Energie in genau entgegengesetzter Richtung emittiert. Verzeichnen also zwei Detektoren, die einander auf einem Ring gegenüberliegen, gleichzeitig Photonen dieser Energie, muss der Ort der Aussendung und damit näherungsweise des radioaktiven Zerfalls selbst auf der Verbindungsgeraden der beiden Detektoren liegen.

Häufig wird bei der PET radioaktiv markierte Glucose eingesetzt. Eine ungewöhnliche Konzentration des energiereichen Zuckers kann auf stoffwechselaktive Tumore oder neurologische Erkrankungen hinweisen. Mit dem Verfahren lassen sich aber auch Wahrnehmungsprozesse abbilden, denn aktive Hirnregionen benötigen ebenfalls reichlich Energie.

Im Gegensatz zu diesen beiden Methoden kommt die seit den 1980er Jahren gebräuchliche Kernspin- beziehungsweise Magnetresonanztomografie (MRT) ohne Röntgenstrahlung oder Radioaktivität aus. Der Patient wird vielmehr einem starken Magnetfeld ausgesetzt, das die Kerne der Wasserstoffatome in seinen Geweben wie winzige Stabmagnete ausrichtet. Elektromagnetische Wellen kippen die Minimagnete aus ihrer Lage; bei der Rückkehr in den Ausgangszustand (Relaxation genannt) senden die Protonen ihrerseits ein »Radiosignal« aus. Daraus berechnet ein Computer die gewebeabhängige Dichteverteilung der Wasserstoffkerne. Ein drittes Magnetfeld mit zu- oder abnehmender Stärke (Gradientenfeld) modifiziert die Feldstärke entlang der Körperachse, um eine räumliche Zuordnung der empfangenen Radiosignale zu ermöglichen. Dieses Verfahren eignet sich vor allem für Weichteilgewebe, die sich im CT nur relativ kontrastarm darstellen lassen.

Der Artikel basiert auf einem Beitrag von **Mark Fischetti**, Redakteur von Scientific American.

Tomografen liefern Schnittbilder durch den Körper (hier die Herzregion).



Kühlsystem

Sender für das Radiosignal

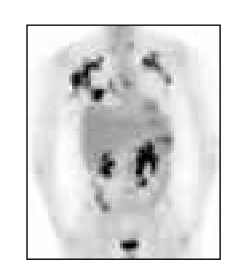
Empfangsspule

Fotoverstärker

radioaktiv markierte Substanz

hochenergetische Photonen

Positronen-Emissionstomografie (PET): Mit radioaktiven Isotopen werden stoffwechselaktive Moleküle wie der Zucker Glucose markiert. Beim radioaktiven Zerfall entstehen zwei Gammaquanten einer ganz bestimmten Energie, die in entgegengesetzten Richtungen davonfliegen. Registrieren entsprechende Fotoverstärker diese simultan, definiert das eine Linie durch den Aussendungsort. Viele sich schneidende Linien ergeben ein Bild der Stoffwechselrate.



Krebszellen mit hohem Stoffwechsel wachsen in Lymphknoten ein (dunkle Bereiche, oben links und rechts).

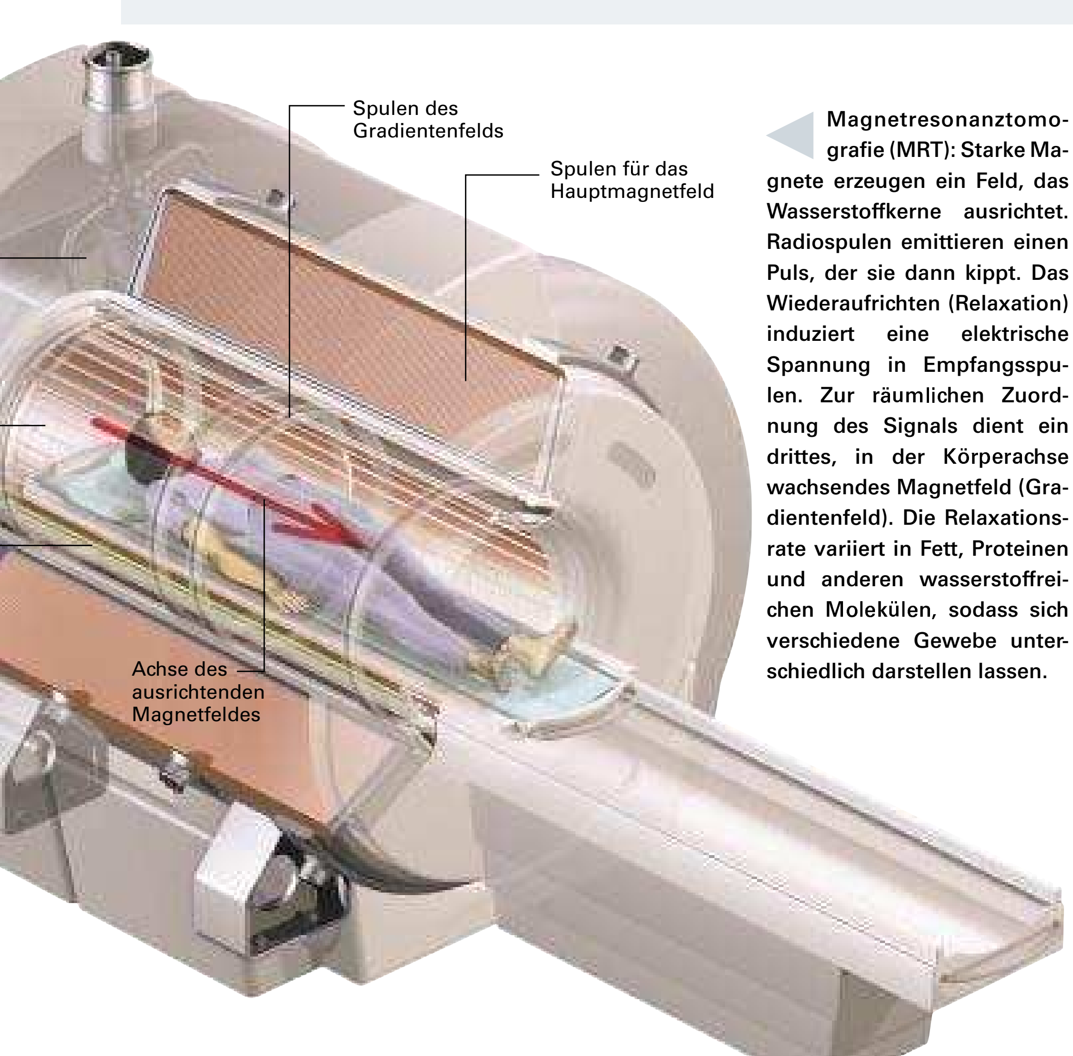
WUSSTEN SIE SCHON?

▶ **Die Magnetresonanztomografie (MRT)** begann unter anderem Namen: Im Englischen ursprünglich als *nuclear magnetic resonance* (NMR) bezeichnet, sollte die Umbenennung im Deutschen zur Kernspinresonanz jede Assoziation mit radioaktiver Strahlung verhindern.

▶ **Die Strahlenbelastung einer CT-Untersuchung** liegt bei 3 bis 10 Millisievert (mSv). Zum Vergleich: Bei einer konventionellen Röntgenaufnahme sind es 0,3 mSv, die natürliche Hintergrundstrahlung beträgt in Deutschland auf Meereshöhe bereits 2,5 mSv.

▶ **Das Hauptmagnetfeld der MRT** ist mit meist 1,5 Tesla einige zehntausend Mal stärker als das Feld der Erde (50 Mikrotesla). Um diesen Wert zu erreichen, fließt ein Strom von 400 Ampere durch die Spulen. Kupferleitungen würden dabei schlicht schmelzen. Deshalb kühlt man die Spulen mit flüssigem Helium auf 4,2 Kelvin ab und verwendet supraleitende Materialien, die dann keinen elektrischen Widerstand mehr zeigen. Tatsächlich ist die MRT das Haupteinsatzgebiet der Supraleitung.

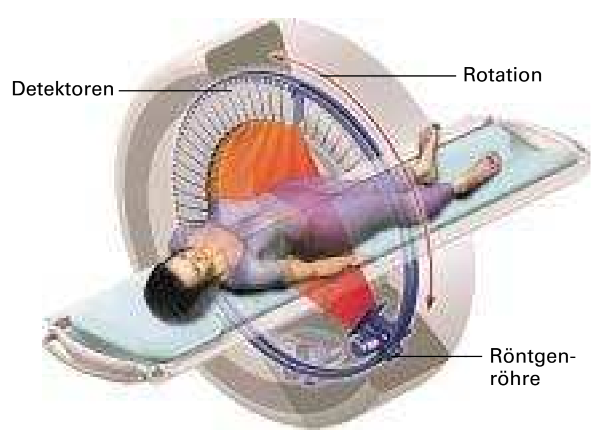
▶ **Mit Sauerstoff beladenes Hämoglobin** verhält sich magnetisch anders als unbeladenes. Die funktionelle MRT (fMRT) macht sich diese Tatsache zu Nutze, um dynamische Prozesse abzubilden. Aktive Gehirnregionen benötigen mehr Sauerstoff, weshalb die Blutzufuhr steigt.



◀ **Magnetresonanztomografie (MRT): Starke Magnete erzeugen ein Feld, das Wasserstoffkerne ausrichtet. Radiospulen emittieren einen Puls, der sie dann kippt. Das Wiederaufrichten (Relaxation) induziert eine elektrische Spannung in Empfangsspulen. Zur räumlichen Zuordnung des Signals dient ein drittes, in der Körperachse wachsendes Magnetfeld (Gradientenfeld). Die Relaxationsrate variiert in Fett, Proteinen und anderen wasserstoffreichen Molekülen, sodass sich verschiedene Gewebe unterschiedlich darstellen lassen.**



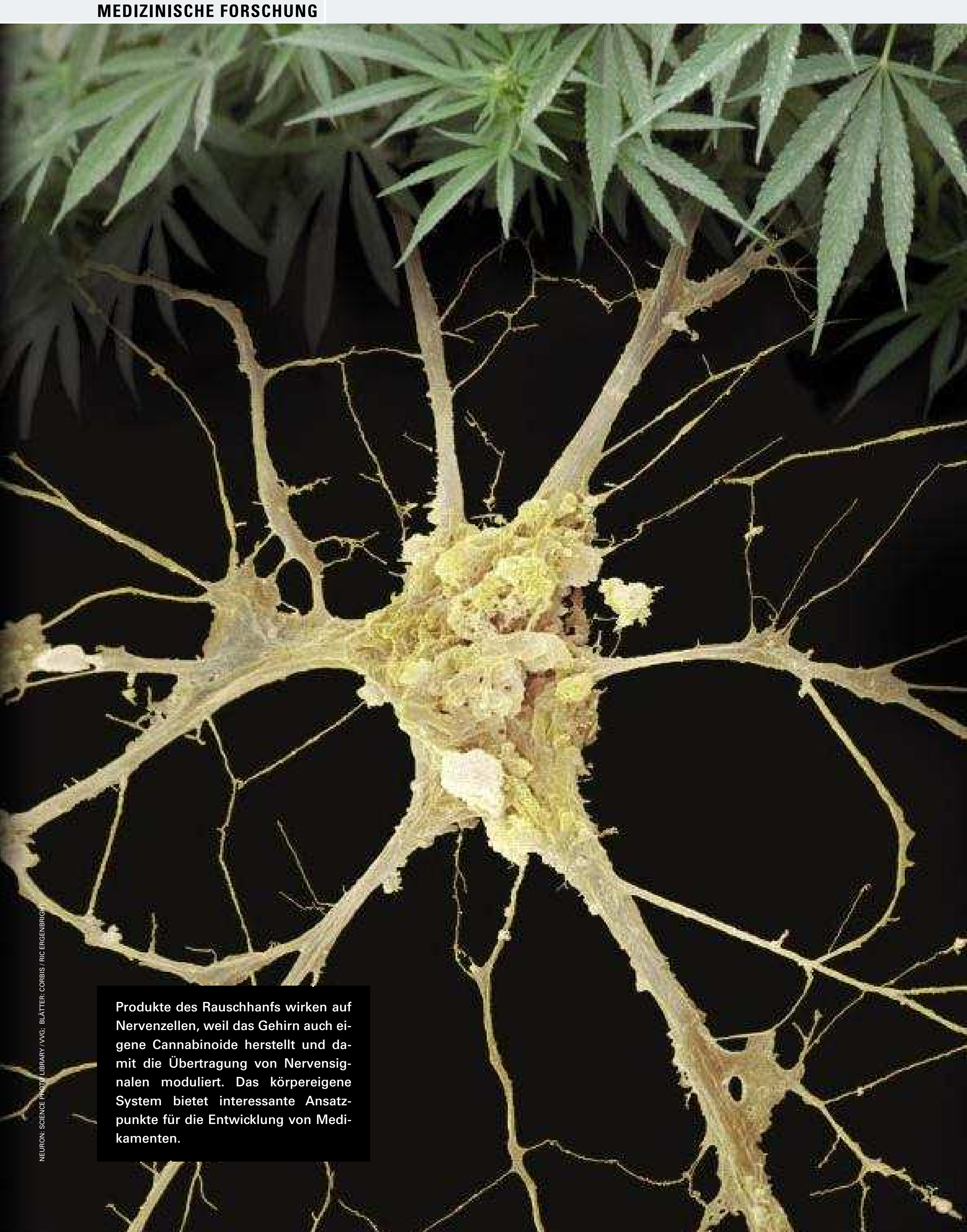
▲ **Ein Vorfall der Bandscheibe (Kreis) drückt auf das Rückenmark.**



◀ **Computertomografie (CT): Eine Röhre sendet Röntgenstrahlung durch den Körper. Detektoren messen deren Schwächung durch Absorption und Reflexion. Röhre und Detektoren rotieren, um ein Tomogramm aufzunehmen. Die Liege verschiebt den Patienten einige Zentimeter und der Prozess wiederholt sich.**

▼ **Ein großes Blutgerinnsel verengt die Lungenarterie (unterhalb des Herzens in der Mitte).**





NEURON: SCIENCE PHOTO LIBRARY / VVG; BLÄTTER: CORBIS / RIC ERGENBRIGHT

Produkte des Rauschhanfs wirken auf Nervenzellen, weil das Gehirn auch eigene Cannabinoide herstellt und damit die Übertragung von Nervensignalen moduliert. Das körpereigene System bietet interessante Ansatzpunkte für die Entwicklung von Medikamenten.

Das Gehirn und sein Marihuana

Die Erforschung hirneigener Stoffe, die ähnlich wie Cannabis auf das Denkorgan wirken, verspricht ein besseres Verständnis medizinischer Probleme wie Schmerz, Angst oder Essstörungen – und könnte neue Behandlungsmöglichkeiten erschließen.

Von Roger A. Nicoll und Bradley E. Alger

Marihuana, Haschisch oder allgemein Cannabis – wie immer man die seit Jahrtausenden schon gebrauchten Drogen aus der Hanfpflanze auch nennt, jeder assoziiert anderes damit. Etwa bekiffte Hippies in stumpfer Apathie. Einen Joint zum Entspannen von der Wahnsinnshektik unserer Zeit. Eine Hoffnung für Krebspatienten, ihre Chemotherapie ohne zermürbendes Erbrechen zu überstehen. Die Aussicht auf Linderung chronischer Schmerzen.

Was aber kaum jemand weiß – selbst der schärfste Gegner von Rauschmitteln erlebt alltäglich die Wirkung der Droge. Unser Gehirn produziert nämlich sein eigenes Cannabis: in Form von Endocannabinoiden. Die Bezeichnung leitet sich ab von dem griechischen Wort für innen und dem Gattungsnamen des Indischen Hanfs *Cannabis sativa*.

Die Erforschung dieser körpereigenen Verbindungen und ihrer Effekte förderte Überraschendes im Gehirn zu Tage: ein völlig neues Signalsystem, dessen Kommunikationsweise noch vor 15 Jahren niemand erwartet hätte. Von der detaillierten Aufklärung dieses Systems erhofft sich die Fachwelt zugleich einen Schlüssel zur Behandlung unterschiedlicher medizinischer Probleme, darunter Angst, Schmerz, Erbrechen, Übergewicht und Hirnverletzungen. Daraus könnten eines Tages maßgeschneiderte Medikamente hervorgehen, die möglichst keine der unerwünschten Nebenwirkungen von Cannabis hervorrufen.

Gleich unter welchem Namen oder in welcher Form verwendet, Cannabis gehört zu den weltweit verbreitetsten psychoaktiven Drogen. Wozu die Hanfpflanze, die auch Fasern liefert, genutzt wurde und wird, variiert je nach Kulturkreis. Im alten China war die schmerzstillende und bewusstseinsverändernde Wirkung bereits bekannt. Hanf wurde dort aber weniger wegen seiner psychoaktiven Eigenschaften als vielmehr für die Herstellung von Seilen und Tuch ▷

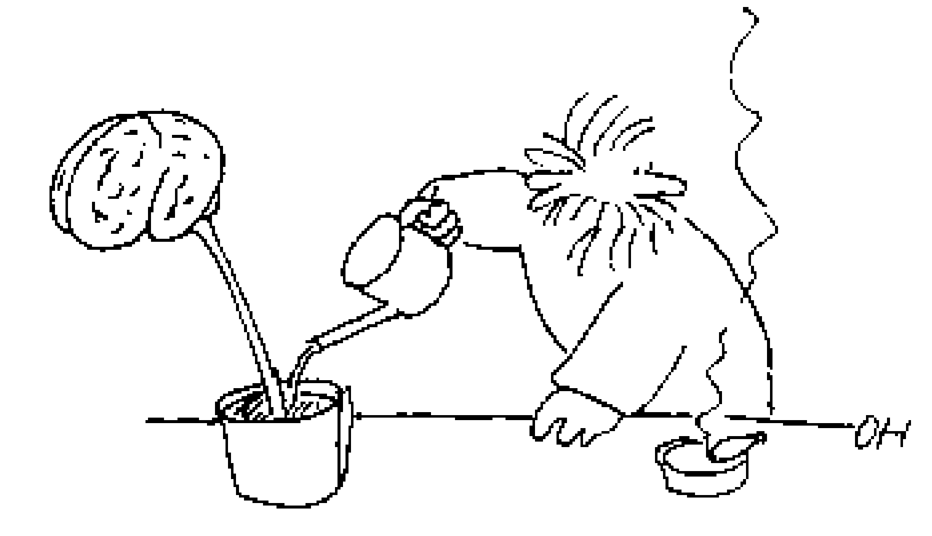
▷ weithin angebaut. Auch die Griechen und Römer der Antike stellten Taue und Segel daraus her. In manchen Teilen der Welt rückte jedoch die Drogenwirkung der Pflanze in den Vordergrund, in Indien beispielsweise wurde sie in religiöse Rituale einbezogen. In arabischen Ländern war während des Mittelalters ihr Gebrauch üblich; im Irak des 15. Jahrhunderts behandelten Ärzte damit Epileptiker. Ägyptern diente Cannabis vorwiegend als Rauschmittel. Nach Napoleons Ägyptenfeldzug begannen auch Europäer, es zu konsumieren. Mit dem Sklavenhandel gelangte die Droge von Afrika nach Mexiko, in die Karibik und nach Südamerika.

Millionen Menschen konsumieren heute Cannabis wegen seiner berauschenden Wirkung, die von vielen mit einem alkoholbedingten Hochgefühl verglichen wird, individuell aber unterschiedlich ist. In hohen Dosen verursacht die Droge bei manchen Menschen Halluzinationen, während sie andere einfach nur schläfrig macht. Beeinträchtigt werden Kurzzeitgedächtnis, Wahrnehmungs- und Denkvermögen sowie die motorische Koordination; allerdings scheint das Ganze reversibel zu sein, wenn der Körper sich der Droge entledigt hat. Marihuana oder Hasch zu rauchen geht außerdem mit ähnlichen Gesundheitsrisiken einher wie Tabakgenuss.

Dem gegenüber stehen medizinisch nützliche Eigenschaften von Cannabis:

- Es lindert Schmerzen und Angstzustände,
- kann das Absterben verletzter Hirnneuronen verhindern,
- unterdrückt Brechreiz und regt den Appetit an, ist damit hilfreich für Patienten, die etwa infolge einer Chemotherapie unter einem starken Gewichtsverlust leiden.

Herauszufinden, wie die Droge derartig viele Effekte hervorrufen kann, dauerte lange. Nachdem Generationen von Forschern sich fast schon ein Jahrhundert damit befasst hatten, war 1964 eine wichtige Etappe erreicht: Raphael Mechoulam von der Hebräischen Universität in Jerusalem identifizierte den entscheidenden Bestandteil strukturell als Delta-9-Tetrahydrocannabinol. THC, so das geläufige Kürzel, ist unter den zahlreichen Inhaltsstoffen für fast die gesamte pharmakologische Wirkung verantwortlich. Weitere Jahrzehnte dauerte es, unter den vielen molekularen Zellrezeptoren wenigstens einen zu finden, an den THC gezielt andockt.



Reichlich Rezeptoren für Cannabis

Kleine Proteine, die als Rezeptoren fungieren, kommen in der Außenmembran aller Zellen vor, inklusive Nervenzellen. Ihr Bindungspartner muss wie ein Schlüssel ins Schloss passen, wenn er in der Zelle spezifisch etwas auslösen soll. Manche Rezeptoren etwa verfügen über wassergefüllte Kanäle, die sich öffnen und dann geladene Ionen ein- oder ausströmen lassen. Dadurch verändert sich auch das elektrische Spannungsgefälle, das zwischen Innen- und Außenseite einer Zelle besteht. Eine andere große Familie von Rezeptoren umfasst keine Kanäle, dafür sind ihre Mitglieder mit so genannten G-Proteinen gekoppelt. Über diese Vermittler in der Zelle setzen die Rezeptoren unterschiedliche biochemische Signalkaskaden in Gang, die nicht selten wieder verändernd auf Ionenkanäle einwirken.

Im Jahr 1988 erzeugten Allyn C. Howlett und ihre Kollegen an der Universität St. Louis (Missouri) einen radioaktiv markierten synthetischen Abkömmling von THC und durchmusterten mit ihm als Sonde Zellfragmente aus Hirngewebe von Ratten. Die Moleküle hefteten sich an etwas in Membranen, das sich dann als erster Cannabinoid-Rezeptor erwies. Dank dieser sowie anderer Arbeiten von Miles Herkenham an den Nationalen Gesundheitsinstituten in Bethesda (Maryland) erkannte dessen Institutskollegin Lisa Matsuda 1990, dass ein von ihr kloniertes Gen für den Rezeptor codieren musste.

Wie wichtig das inzwischen als CB1 bezeichnete Molekül für die Wirkung von THC ist, belegten später zwei Forscher unabhängig voneinander: Catherine Ledent von der Freien Universität Brüssel sowie Andreas Zimmer von der Universität Bonn. Beide erzeugten Mäuse ohne diesen Rezeptor, und dort blieb THC praktisch wirkungslos. (Anders als CB1, der vorwiegend auf Nervenzellen sitzt, kommt der drei Jahre später entdeckte CB2 nur außerhalb von Gehirn und Rückenmark vor und hat mit dem Immunsystem zu tun.)

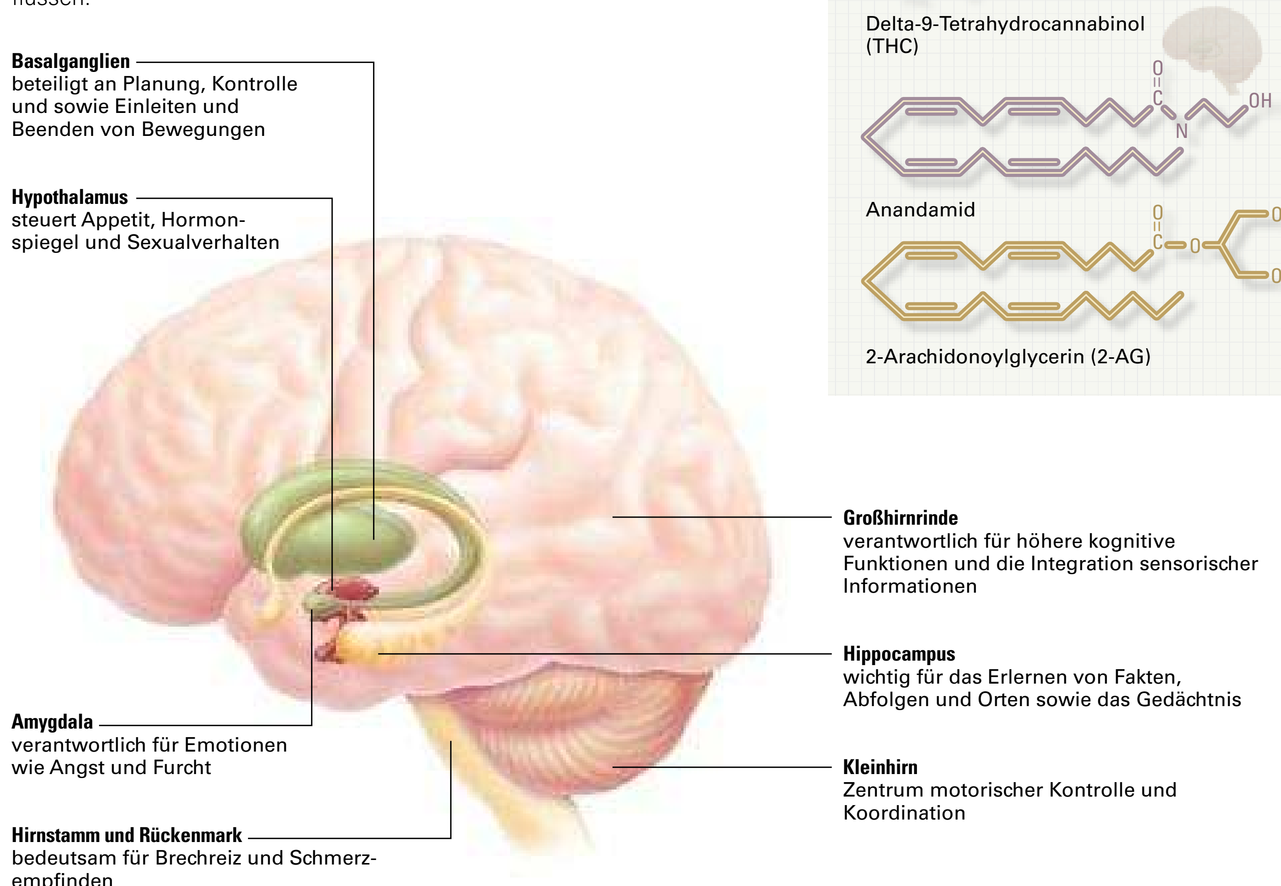
CB1 erwies sich als einer der häufigsten mit G-Proteinen gekoppelten Rezeptoren im Zentralnervensystem. Seine Dichte ist dort in bestimmten Regionen besonders hoch, und aus deren Bedeutung erklären sich die vielfältigen Effekte von Cannabis (siehe Kasten rechte Seite). Ihre psychoaktive Macht beispielsweise entfaltet die Droge über die Großhirnrinde. Gedächtnisstörungen verursacht sie über den Hippocampus; diese Struktur ist für das Einspeichern von Informa-

IN KÜRZE

- Cannabis-Drogen wie **Marihuana und Haschisch** beeinflussen das Verhalten, indem sie auf Rezeptoren für hirneigene Verbindungen wirken.
- Diese so genannten Endocannabinoide sind unter anderem an der **Regulation** von **Schmerz, Angst, Hunger und Brechreiz** beteiligt.
- Versucht wird daher, Medikamente zu entwickeln, die bestimmte therapeutisch **nützliche Aktivitäten von Endocannabinoiden** nachahmen, ohne manche der Nebenwirkungen von Cannabis hervorzurufen. Forscher erhoffen sich davon neue Behandlungswege für verschiedene medizinische Probleme.

Wo Cannabis wirkt

Die Substanz THC aus dem Rauschhanf kann wie die körpereigenen Stoffe Anandamid und 2-AG denselben Rezeptor im Gehirn aktivieren, obwohl ihre chemische Struktur (rechts) deutlich anders ist. Dieser Rezeptortyp kommt in vielen Hirnregionen vor (einige erläutert die Grafik unten), was die diversen Effekte von Cannabis erklärt. Forscher sehen aber durchaus Möglichkeiten, Medikamente zu entwickeln, die gezielter an einer gewünschten Stelle wirken, um beispielsweise Schmerz oder Hungergefühl zu beeinflussen.



tionen wesentlich. Motorische Fehlfunktionen erklären sich aus dem Einfluss auf entsprechende Kontrollzentren. Schmerzempfinden dämpft die Droge über ihre Angriffspunkte in Rückenmark und Hirnstamm; Letzterer steuert darüber hinaus den Brechreflex. Den Appetit beeinflusst sie über den Hypothalamus, Emotionen dagegen über den Mandelkern.

Glückseligkeitsstoff im Gehirn

Nicht nur die Grob-, auch die Feinlokalisation des Rezeptors erwies sich als aufschlussreich. Mit eleganten Studien zeigten Tamás F. Freund vom Institut für Experimentelle Medizin in Budapest und Kenneth P. Mackie von der Universität von Washington in St. Louis, dass der Cannabinoid-Rezeptor nur auf bestimmten Nervenzellen auftrat und dort an sehr spezifischer Stelle. So saß er dicht gedrängt auf Neuronen, die – wenn sie »feuern« – am Ende ihrer Nervenfaser einen inhibitorischen Signalstoff namens Gamma-Aminobuttersäure ausschütten. GABA, so das englische Kürzel, ist der wichtigste hemmende Neurotransmitter im Gehirn. Er drosselt ein nachgeschaltetes Empfängerneuron, das von anderswo aktivierende Signale erhalten kann. Da der Cannabinoid-Rezeptor überdies unweit der Schaltstelle, der Synapse, residierte, lag der Schluss nahe, dass er irgendetwas mit der GABA-Signalgebung zu tun hatte. Doch warum sollte ein Übertragungssystem des Gehirns einen Rezeptor für eine pflanzliche Substanz beinhalten?

Die gleiche Frage hatte sich bereits vor mehr als drei Jahrzehnten gestellt, diesmal hinsichtlich Morphium. Diese Substanz ist in dem aus Schlafmohn gewonnenen Opium enthalten und heftet sich an so genannte Opiat-Rezeptoren im Gehirn. Mitte der 1970er Jahre entdeckten Forscher schließlich, dass der Körper selbst so etwas wie Opiate bildet – die Enkephaline und Endorphine. Morphium besetzt ganz einfach nur die Rezeptoren, die das Gehirn für die eigenen, chemisch aber ganz anderen Opioide bereitstellt.

Was aber war das hirneigene Cannabinoid? 1992 – 28 Jahre nachdem Me- ▷

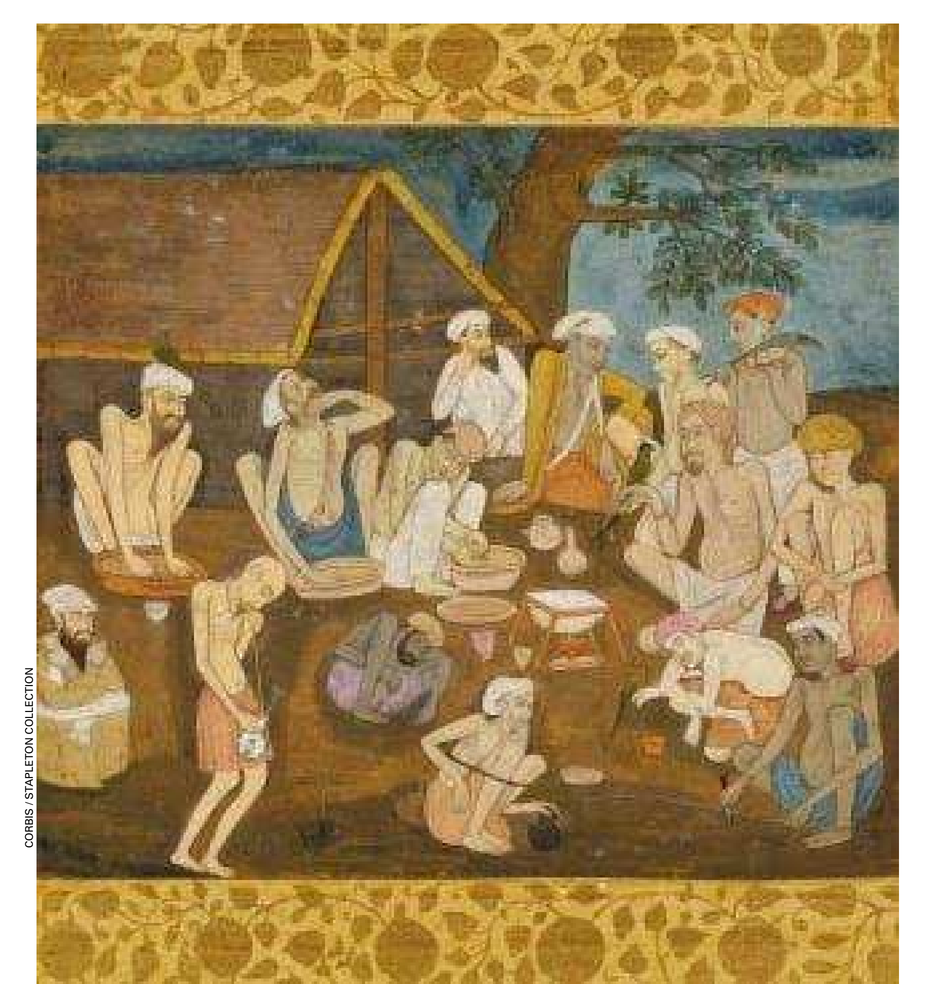
▷ choulam in Jerusalem das THC identifiziert hatte – entdeckte er den ersten Kandidaten: eine kleine Fettsäure im Hirn, die sich dort an den neuen Rezeptor heftete und ähnliche Aktivitäten entfaltete wie Cannabis. Er taufte sie Anandamid, nach dem Sanskrit-Wort *ananda* für Glückseligkeit.

Später entdeckten Daniele Piomelli und Nephi Stella von der Universität von Kalifornien in Irvine, dass ein anderer entsprechend wirkender Fettstoff in bestimmten Hirnregionen sogar noch häufiger vorkommt. Es handelt sich um 2-Arachidonoylglycerin, kurz 2-AG. Beide Substanzen stellen vermutlich die wichtigsten endogenen Cannabinoide dar. (Kürzlich entdeckte Verbindungen sind möglicherweise ebenfalls Endocannabinoide, aber ihre Funktion ist noch unbestimmt.) Der Pflanzenstoff imitiert sie quasi.

Herkömmliche Neurotransmitter sind wasserlöslich und werden als Konzentrat in kleinen Vorratsbläschen an der Senderseite der Synapse gespeichert. Ein elektrischer Nervenimpuls von ihrer Zelle setzt die Moleküle frei. Sie diffundieren über den winzigen synaptischen Spalt zur Gegenseite. Dort docken sie an Rezeptoren auf dem Empfängerneuron an. Anders die »fettigen« Endocannabinoide: Sie werden nicht gespeichert, sondern schnell aus Bestandteilen der Zellmembran synthetisiert. Außerdem werden sie nicht nur an einer Stelle, sondern verteilt über die ganze Zelle freigesetzt, wenn deren Calciumspiegel steigt oder bestimmte mit G-Proteinen gekoppelte Rezeptoren ansprechen.

Welche Rolle solch unkonventionelle Neurotransmitter im Gehirn spielen, blieb jahrelang ein Rätsel. Der Schleier lüftete sich nur auf etwas verschlungene Weise. Verschiedene Forscher – darunter einer von uns, Alger, und sein Kollege Thomas A. Pitler an der Universität von Maryland in Baltimore – bemerkten in den frühen 1990er Jahren bei ihren Untersuchungen an Pyramidenzellen etwas Ungewöhnliches. Das sind die Hauptzellen des Hippocampus. Stieg ihr Calciumspiegel kurzfristig, reduzierte sich das hemmende Signal, das von GABA-Neuronen bei ihnen einlief. Um dieselbe Zeit beobachtete eine Gruppe um Alain Marty, der inzwischen am Laboratorium für Hirnphysiologie der René-Descartes-Universität in Paris arbeitet, so etwas bei Nervenzellen des Kleinhirns. Unerwartet war das Ganze, weil die Empfängerzellen irgendwie auf die Senderzellen rückzuwirken schienen – soweit damals aber bekannt war, wanderten Signale im ausgereiften Gehirn nur in eine Richtung über die Synapsen: vom »feuernden« Sender- zum Empfängerneuron.

▼ **Indische Fakire bereiten auf diesem Gemälde aus dem 18. Jahrhundert »Bhang« und »Ganja« vor. Den medizinischen Einsatz von Cannabis-Produkten erwähnen bereits alte chinesische und ägyptische Texte. Die Entdeckung der aktiven Hauptsubstanz, des Cannabinols Delta-9-THC, in den 1960er Jahren führte schließlich auf die Spur des hirneigenen »Marihuanas«.**



CORBIS / STAPLETON COLLECTION

Freie Bahn durch gehemmte Hemmung

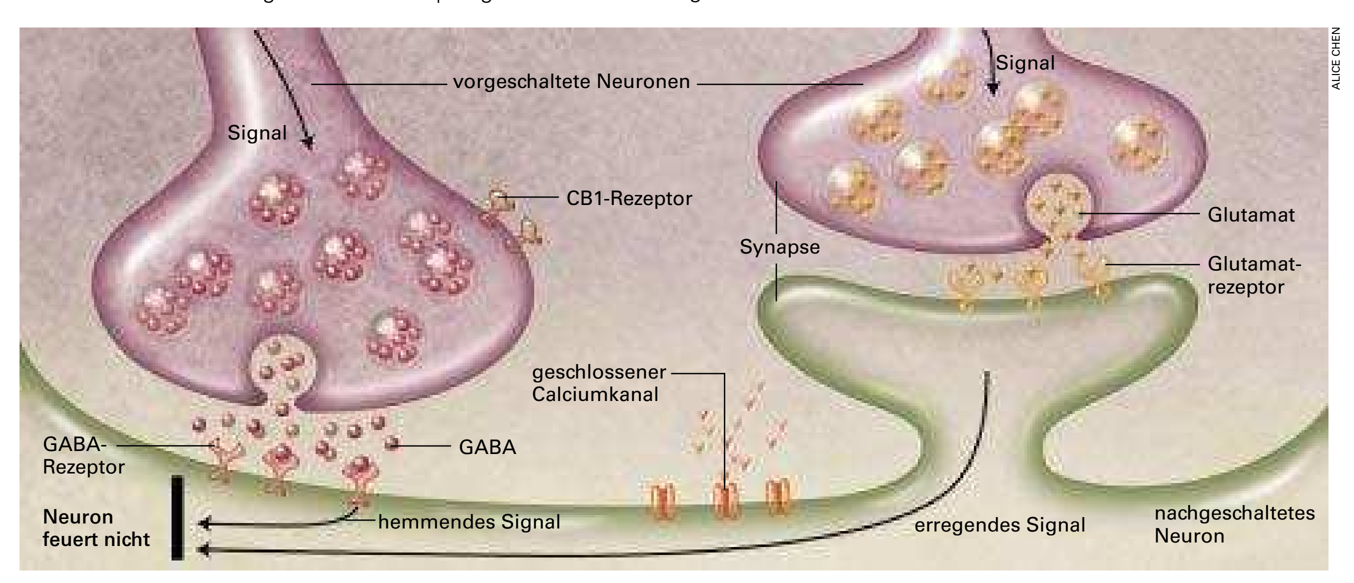
War man hier auf eine neue Form neuronaler Kommunikation gestoßen? Wissenschaftler, die sich in die Sache vertieften, nannten das Phänomen DSI, nach dem Englischen für depolarisationsinduzierte Unterdrückung der Hemmung. Damit es dazu kommt, musste ein noch unbekannter Bote von der Empfängerzelle zurück zum sendenden GABA-Neuron gelangen und dort irgendwie die Abgabe des hemmenden Neurotransmitters unterbinden.

Ein rückwirkendes, retrogrades Signalisieren kannte man bis dahin nur aus dem sich entwickelnden Nervensystem. Sollte so etwas auch bei anderen Prozessen im Gehirn eine Rolle spielen, wenn reife Neuronen interagieren? Rücksignale könnten Formen neuronaler Informationsverarbeitung erleichtern, die mit konventioneller synaptischer Übertragung schwierig oder gar nicht zu bewerkstelligen wären. Daher galt es, die Eigenschaften des retrograden Signals zu ergründen. Doch den Protagonisten überhaupt nur zu finden war alles andere als einfach. Über die Jahre wurden unzählige Moleküle vorgeschlagen. Keines erfüllte die Vorgaben.

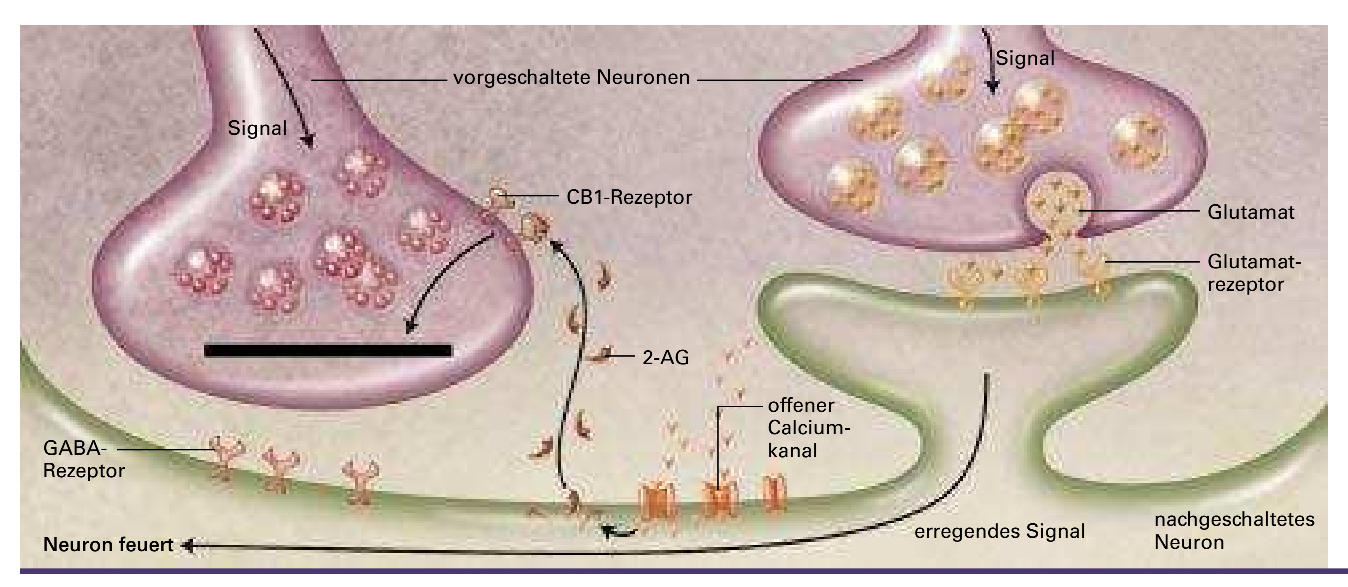
Dann wurden zwei Teams unabhängig voneinander fündig: Das eine geleitet von Masanobu Kano von der Universität Kanazawa (Japan), das andere bestand aus einem von uns (Nicoll) und seiner Kollegin Rachel I. Wilson von der Universität von Kalifornien in San Francisco. Beide Gruppen berichteten 2001, dass die Kriterien perfekt von einem Endocannabinoid, vermutlich 2-Arachidonoylglycerin, erfüllt werden. Denn eine Blockade des Cannabinoid-Rezeptors

Kommunikation nach hinten

Körpereigene Cannabinoide, die Endocannabinoide, führten zur Entdeckung einer so genannten retrograden Signalgebung im Gehirn. Wenn ein Senderneuron einen Neurotransmitter als Botenstoff abgibt, so wandert dieser über den schmalen Spalt der Kontaktstelle zum nachgeschalteten Empfängerneuron. Endocannabinoide hingegen agieren in entgegengesetzter Richtung: Sie wandern von der nach- zur vorgeschalteten Zelle. Auf diese Weise drosselt zum Beispiel das Endocannabinoid 2-AG den Ausstoß des hemmenden Neurotransmitters GABA an der vorgeschalteten Zelle.



Trifft das hemmende GABA-Signal gleichzeitig mit einem erregenden Signal, etwa dem Neurotransmitter Glutamat, an einer nachgeschalteten Empfängerzelle ein, kann es diese am »Feuern« hindern (obere Grafik). Wenn aber veränderte Calciumkonzentrationen die Produktion von 2-AG im Empfängerneuron auslösen, wandert diese Substanz als Rücksignal zu ihren entsprechenden Rezeptoren (CB1) auf der GABA-Nervenzelle (untere Grafik). In einem Prozess, der als depolarisationsinduzierte Unterdrückung der Hemmung (englisch *depolarization-induced suppression of inhibition*, DSI) bezeichnet wird, hemmt das Endocannabinoid die Ausschüttung von GABA. Dadurch können die erregenden Signale nun die nachgeschaltete Zelle aktivieren.



auf Senderzellen verhinderte auch eine DSI – und umgekehrt. Wenig später zeigten sie und andere Forscher, dass in Mäusen ohne Cannabinoid-Rezeptoren keine solche unterdrückte Hemmung auftritt. Die Position dieser Rezeptoren – an der Endigung von GABA-Neuronen – fügte sich nun genau ins Bild. Sie waren dazu da, auf Endocannabinoide aus der Membran naher Empfängerzellen anzusprechen.

Mit der Zeit entpuppte sich die DSI als ein wichtiger Aspekt der Gehirntätigkeit. Ein vorübergehendes Abschwächen der GABA-bedingten Hemmung fördert nämlich eine Form des neuronalen Lernens, die fachlich als Langzeitpotenzierung bekannt ist und entsprechende synaptische Verbindungen festigt. Enger verknüpft werden bei dieser Art des Einspeicherns und des verbesserten Infor- ▷

mationstransfers oft nur kleine Gruppen von Neuronen. Endocannabinoide sind geradezu prädestiniert, derart kleine Ensembles zu beeinflussen. Als fettlösliche Moleküle diffundieren sie im wässrigen außerzellulären Milieu des Gehirns nicht sehr weit. Auch dass Zellen sie rasch aufnehmen und abbauen, trägt zu einer räumlich und zeitlich begrenzten Wirkung der DSI-Auslöser bei. Dank ihnen können sich einzelne Neuronen daher kurzfristig von den hemmenden Nachbarn entkoppeln und Informationen kodieren.

Eine Fülle anderer Befunde schloss weitere Verständnislücken, was die Aufgaben der Endocannabinoide anbelangt. So stellte sich heraus, dass die Moleküle in einigen Fällen auch blockierend auf Neuronen wirken können, die statt hemmender Neurotransmitter erregende abgeben. Die betreffenden Zellen tragen ebenfalls CB1-Rezeptoren. Am Kleinhirn festgestellt haben dies Anatol C. Kreitzer, jetzt an der Universität Stanford (Kalifornien), und Wade G. Regehr von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts). In dieser Hirnstruktur tragen Endocannabinoide an erregenden Nervenendigungen dazu bei, die Unmenge Synapsen zu regulieren, die an der Bewegungskoordination und der sensorischen Integration beteiligt sind. Das erklärt teilweise die leichten motorischen Fehlfunktionen und veränderten Sinneswahrnehmungen, die oft beim Rauchen von Cannabis auftreten.

Gegen die Angst

Mit neueren Entdeckungen klärt sich allmählich auch genauer, wie die neuronalen mit den verhaltensphysiologischen Effekten der Endocannabinoide zusammenhängen. Beispiel Angst: Ein gängiger Versuch in der Grundlagenforschung besteht darin, Nagetieren beizubringen, dass ein bestimmtes Signal, etwa ein Ton, mit einem leichten elektrischen Schlag an den Pfoten einhergeht. Nach einer Weile erstarrt das Tier schon vor Schreck, sobald es nur den Ton hört. Bleibt der Ton dann jedoch wiederholt ohne Folgen, verliert es seine Furcht davor – die Angstkonditionierung wird gelöscht. Im Jahr 2003 zeigte ein Team um Giovanni Marsicano vom Max-Planck-Institut für Psychiatrie in München, dass Mäuse ohne intakte CB1-Rezeptoren zwar ohne Weiteres den Ton zu fürchten lernen, anders als normale Artgenossen aber diese Angst nicht mehr ablegen können, wenn die Begleitschocks ausbleiben.

Dies lieferte einen Hinweis, wie bedeutsam Endocannabinoide sind, um das Unbehagen und den Schmerz zu löschen, die mit der Erinnerung wieder aufkommen. Vorstellbar wäre daher, dass ein Zuwenig an diesen Neuromodulatoren oder ihren Rezeptoren mitschuldig ist an Phobien, posttraumatischen Belastungsstörungen und bestimmten Formen chronischer Schmerzen. Zu dieser These passt auch, dass manche Menschen Marihuana rauchen, um ihre Ängste zu mindern. Ebenfalls denkbar, wenn auch längst nicht bewiesen, ist, dass Pharmaka, welche die endogenen Cannabinoide imitieren, Patienten helfen könnten, die Vergangenheit hinter sich zu lassen und für die Realität bedeutungslos gewordene Signale nicht mehr mit bestimmten Gefahren zu assoziieren.

Hilfreiche Ansätze am Cannabinoid-System



CORBIS / JEFF ALBERTSON

Diese amerikanische Krebspatientin raucht Marihuana, um die Übelkeit auf Grund ihrer Chemotherapie zu mildern. Ärzte können Mittel, die auf dem Hauptwirkstoff basieren, verschreiben.

Pharmaka, die bestimmte Wirkungen der hirneigenen Cannabinoide verstärken oder verhindern, sollten bei der Behandlung einer ganzen Reihe medizinischer Probleme von Nutzen sein. Noch ist aber viel Forschung nötig.

Angstzustände:
Chronische Ängste und posttraumatische Belastungsstörungen könnten Experimenten zufolge an einer unzureichenden Abgabe von Endocannabinoiden liegen oder an einem Mangel an darauf ansprechenden Rezeptoren. Um die Angstzustände zu mindern, wollen Forscher den Abbau von Anandamid bremsen und damit die Menge erhöhen, die auf die Rezeptoren einwirkt.

Übelkeit und Erbrechen:
Die aktive Substanz in Cannabis ist das THC. Ihr gleiche oder ähnliche Wirkstoffe, darunter Dronabinol und Nabilon, reduzieren die Übelkeitsgefühle im Rahmen einer Chemotherapie.

Appetitmangel und Fettleibigkeit:
Dronabinol hat sich bei Aids-Patienten als Appetitanreger erwiesen. Umgekehrt ist zu schließen, dass Antagonisten – also Stoffe, die Cannabinoid-Rezeptoren blockieren – vielleicht den Appetit zügeln. Klinische Versuche in den USA mit einem dieser Antagonisten waren viel versprechend, verzeichneten aber eine Menge Nebenwirkungen.

Neurologische Störungen:
Der Neurotransmitter Dopamin, bedeutsam für Glücksgefühle und Motorik, löst auch die Freisetzung von Endocannabinoiden aus. Über eine Regulation der Endocannabinoid-Aktivität erhoffen sich Wissenschaftler einmal Hilfe für Parkinson-Patienten, Suchtkranke und Menschen mit anderen Störungen, an denen das Dopaminsystem beteiligt ist.

Schmerz:
Mehrere Schmerzzentren des Gehirns sind reich an Cannabinoid-Rezeptoren. Wirkstoffe, die an diesen Rezeptoren ansetzen, könnten darum zur Schmerzlinderung beitragen.

Zwischen Heil- und Suchtmittel

Bis in die Anfänge des 20. Jahrhunderts war Cannabis in den USA rezeptfrei gegen eine Fülle von Beschwerden erhältlich, darunter Migräne und Geschwüre. Auch in Deutschland verkauften Apotheken Cannabis-Tinkturen. Mit dem zunehmenden Genuss als Rauschmittel wurde es schließlich als illegale Droge eingestuft.

Schätzungen zufolge haben annähernd 30 Prozent der US-amerikanischen Bürger über zwölf Jahre schon einmal die Droge probiert, fünf Prozent konsumieren sie zum aktuellen Zeitpunkt. In der Bundesrepublik haben über neun Millionen Menschen Erfahrung damit, und wie allgemein in der EU steigt der Konsum unter Jugendlichen und jungen Erwachsenen. Fast 400 000 Personen weisen nach Angaben des Bundesministeriums für Gesundheit und Soziale Sicherung einen »missbräuchlichen oder abhängigen Konsum« auf.

Ein Cannabis-Wirkstoff sowie ein Derivat dürfen in Deutschland für medizinische Zwecke auf Betäubungsmittelrezept verschrieben werden. Um das therapeutische Potenzial besser nutzbar zu machen, suchen Forscher nach Wegen, die medizinisch erwünschten Effekte von den anderen trennen.

Noch ist das Repertoire hirneigenen »Marihuanas« nicht völlig ausgelotet, doch die bisherigen Erkenntnisse haben es bereits ermöglicht, Mittel zu entwickeln, welche die medizinischen Eigenschaften von Cannabis nutzen. Synthetisches oder halbsynthetisches THC – Wirkstoffname Dronabinol – ist für therapeutische Zwecke verfügbar und in Deutschland auf Betäubungsmittelrezept verschreibungsfähig, ebenso das THC-Analogon Nabilon. Solche Mittel bekämpfen die Übelkeit im Rahmen einer Chemotherapie. Dronabinol regt darüber hinaus bei Aids-Patienten, die an Auszehrung leiden, den Appetit an. Andere Cannabinoide wirken bei verschiedenen Krankheiten und Störungen schmerzlindernd. Und ein CB1-Antagonist – also eine Verbindung, die den Rezeptor blockiert – hat in einigen klinischen Versuchen gegen Übergewicht geholfen.

Kein Mangel an Eingriffsmöglichkeiten

Allerdings rufen all diese Wirkstoffe noch multiple Effekte hervor, da sie nicht nur in der gewünschten Hirnregion eingreifen. Sie verursachen daher Nebenwirkungen wie Schwindel, Schläfrigkeit, Konzentrationsstörungen und abnormes Denken. Umgehen ließen sich die Risiken einer weiträumigen wahllosen Aktivierung der Rezeptoren, wenn es beispielsweise gelänge, selektiv die Funktion der körpereigenen Cannabinoide zu stärken. Das Ziel: diese Moleküle nur dann und nur dort zu mobilisieren, wo sie tatsächlich gebraucht werden. In einem ersten Schritt entwickeln Piomelli und seine Kollegen Wirkstoffe, die den Abbau von Anandamid nach der Abgabe hemmen. Wird es nicht mehr so schnell beseitigt, hält sein angstmildernder Effekt länger an.

In manchen Hirnregionen ist offenbar Anandamid das häufigste Endocannabinoid, in anderen dominiert hingegen 2-AG. Mit einem besseren Verständnis der jeweiligen Biosynthesewege dürften sich Medikamente entwickeln lassen, die nur den einen oder den anderen beeinflussen. Außerdem ist bekannt, dass Endocannabinoide nicht produziert werden, wenn die Nervenzelle nur einmal feuert – es muss schon fünf- oder sogar zehnmal hintereinander sein. Neu zu entwickelnde Wirkstoffe könnten die Feuerrate und damit die Freisetzung von Endocannabinoiden verändern. Eine Art Präzedenzfall stellt die Klasse krampflösender Mittel dar, welche die neuronale Hyperaktivität bei epileptischen Anfällen unterdrückt, ohne die normale Aktivität zu beeinträchtigen.

Indirekt eingreifen ließe sich schließlich über die körpereigenen Regelkreise für Endocannabinoide. Eine Schlüsselfigur im so genannten Belohnungs- oder Befriedigungssystem des Gehirns ist Dopamin, bekannter als der Neurotransmitter, der bei Parkinson-Patienten in bestimmten Hirnregionen schwindet. Viele Suchtstoffe, darunter Nikotin und Morphium, bewirken in verschiedenen Hirnzentren unter anderem ein Ausschütten von Dopamin. Wie sich zeigte, kann dieses Molekül wiederum die Abgabe von Endocannabinoiden veranlassen. Das tun auch zwei weitere Neurotransmitter, Glutamat und Acetylcholin, welche die Herstellung einleiten.

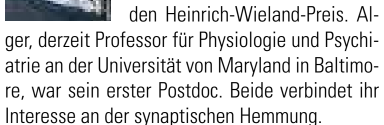
In der Tat könnten Endocannabinoide Auslöser einiger Effekte sein, die bislang einzig diesen konventionellen Signalüberträgern zugeschrieben wurden. Über deren Manipulation, mit zu entwickelnden Wirkstoffen, ließe sich indirekt das Endocannabinoidsystem anvisieren. Regionale Unterschiede in den Neurotransmittersystemen des Gehirns könnte man ausnutzen, um sicherzustellen, dass Endocannabinoide nur dort in angemessener Menge freigesetzt werden, wo sie nötig sind.

Wie es aussieht, existieren Signalsysteme, die mit hirneigenem Marihuana arbeiten, wohl schon seit rund 500 Millionen Jahren. Denn der Rezeptor CB1 scheint bei allen Wirbeltieren vorzukommen. Während dieser Zeit wurden Endocannabinoide in den Dienst zahlreicher, oft subtiler Aufgaben gestellt und daran angepasst – etwa an das Angstauslöschen. Ihr Vorkommen in Hirnregionen, die mit komplexem motorischem Verhalten, Wahrnehmen und Denken, Lernen und Gedächtnis zu tun haben, legt aber nahe, dass noch vieles in dieser Hinsicht zu entdecken bleibt. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



Roger A. Nicoll (oben) und **Bradley E. Alger** arbeiteten erstmals in den späten 1970er Jahren zusammen. Damals war Nicoll gerade an die Universität von Kalifornien in San Francisco gewechselt, wo er jetzt eine Professur für Pharmakologie hat. Nicoll ist Mitglied der Nationalen Akademie der Wissenschaften der USA und erhielt Ende 2004 den Heinrich-Wieland-Preis. Alger, derzeit Professor für Physiologie und Psychiatrie an der Universität von Maryland in Baltimore, war sein erster Postdoc. Beide verbindet ihr Interesse an der synaptischen Hemmung.



Cannabis und Cannabinoide. Von F. Grothenthermen, Verlag Hans Huber, Bern 2005

Endocannabinoid signaling in the brain. Von R. I. Wilson und R. A. Nicoll in: Science, Bd. 296, S. 678, 2002

Retrograde signaling in the regulation of synaptic transmission: focus on endocannabinoids. Von B. E. Alger in: Progress in Neurobiology, Bd. 68, Nr. 4, S. 247, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Einsteins Holodeck

Reisen mit knapper Lichtgeschwindigkeit? Oder gar mit Warpantrieb wie Raumschiff Enterprise? Computersimulationen veranschaulichen die faszinierenden Effekte der Relativitätstheorie.



THEORETISCHE ASTROPHYSIK, INSTITUT FÜR ASTRONOMIE UND ASTROPHYSIK, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

Die Welt sieht anders aus, wenn man sich mit 90 Prozent der Lichtgeschwindigkeit bewegt – hier aus der Perspektive eines Myons, das von oben auf den Tübinger Marktplatz zurast.



Von Hanns Ruder, Hans-Peter Nollert
und dem Visualisierungsteam des SFB 382

Vielen mag Einsteins Relativitätstheorie als Inbegriff eines abstrakten, unanschaulichen Formalismus erscheinen. Dabei haben sowohl die Spezielle als auch die Allgemeine Relativitätstheorie höchst anschauliche Auswirkungen. Besser ges   sie hätten – wenn wir jeden Tag mit 90 Prozent der Lichtgeschwindigkeit zu unserem Arbeitsplatz in der Nähe eines Schwarzen Lochs pendeln und dabei vielleicht noch ein Wurmloch passieren würden. Dies ist heute leider ebenso wenig möglich wie zu Zeiten Einsteins. Zum Glück gibt es inzwischen leistungsfähige Computer, mit denen wenigstens die visuellen Effekte sichtbar und sogar erfahrbar gemacht werden können.

Visuelle Effekte der Speziellen Relativitätstheorie: Wer denkt da nicht an die Längenkontraktion? Ein Gegenstand, der sich relativ zum Beobachter bewegt, erscheint diesem in Bewegungsrichtung kürzer als in Ruhe. Senkrecht zur Bewegungsrichtung bleiben hingegen alle Längen unverändert.

Man muss nicht allzu kühn sein, um zu vermuten, dass man die Längenkontraktion nicht nur ausrechnen und messen kann, sondern bei sehr hohen Relativgeschwindigkeiten auch unmittelbar sehen müsste. Angenommen, ein Astronaut flöge in seinem Raumschiff mit 95 Prozent der Lichtgeschwindigkeit an der Erde vorbei, ungefähr im Abstand der Mondbahn. Ihm böte sich ein Anblick, der dramatisch vom gewohnten Bild der Erde abweichen würde (siehe Bild S. 58).

Wenn die Längenkontraktion unmittelbar sichtbar wäre, erschiene der blaue Planet in Flugrichtung des Raumschiffs erheblich verkürzt und hätte die Form eines flachen Ellipsoids. Doch diese Ansicht wäre fiktiv. Denn für eine realistische Darstellung müssen wir die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts berücksichtigen (siehe Kasten auf S. 59 unten). Dieser elementare Effekt sorgt für ein erstaunliches Resultat: Er kompensiert einen erheblichen Teil der Veränderungen, welche die Längenkontraktion verursacht hat. Der Umriss der Erde ist wieder genau kreisförmig, aber ihre Oberfläche erscheint verdreht. Der Astronaut kann sogar Regionen erkennen, die auf der von ihm abgewandten Seite der Erde liegen.

So simpel der Effekt der endlichen Laufzeit ist – er hat einen ebenso großen Einfluss auf das endgültige Bild wie das Phänomen der Längenkontraktion. Nun ist spätestens seit den Arbeiten des dänischen Astronomen Ole Römer (1644–1710) bekannt, dass Licht sich mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet; sogar ihren Wert hatte Römer recht gut bestimmen können.

Hat sich also jemals ein Physiker vor Einstein überlegt, welche Auswirkungen das bei einem Blick aus dem Fenster während einer sehr schnellen Reise hat? Anscheinend nicht. Dabei wäre er nämlich auf interessante Ergebnisse gestoßen: Entsprechend dem Stand der Physik vor 1900 muss er sich zunächst entscheiden, ob er die so genannten Maxwell-Gleichungen – die Grundgleichungen der Elektrodynamik, welche die Ausbreitung des Lichts als elektromagnetische Welle bestimmen – im Bezugssystem der Erde oder im Bezugssystem des Beobachters lösen will. In der Sprache der Physik des 19. Jahrhunderts kann man diese Unterscheidung auch als Frage formulieren: Bewegt sich die Erde relativ zu einem absoluten Bezugssystem, dem hypothetischen Äther, oder aber der Beobachter – oder vielleicht sogar beide?

Je nachdem, wen wir als bewegt ansehen, wird das Ergebnis unterschiedlich ausfallen (siehe Kasten auf S. 59 oben). So etwas galt unter Physikern auch schon vor Einsteins Relativitätstheorie als problematisch. Das Prinzip der Relativität gab es nämlich schon lange vorher. Es besagt, dass es unmöglich ist, für ein physikalisches System einen absoluten Bewegungs- oder Ruhezustand anzugeben. Dies gilt für die Mechanik ebenso wie für die Elektrodynamik. Die Vorschriften, wie Messgrößen zwischen verschiedenen Bezugssystemen umzurechnen sind – Galileitransformation in der newtonschen Mechanik und Lorentztransformation in der Elektrodynamik –, unterscheiden sich jedoch. Die Maxwell-Gleichungen vertragen sich demnach nicht mit den Gleichungen der newtonschen Mechanik – eines der Hauptprobleme der Physik im ausgehenden 19. Jahrhundert.

In seiner grundlegenden Arbeit aus dem Jahr 1905 mit dem Titel »Zur Elektrodynamik bewegter Körper« beseitigte Einstein diese Unverträglichkeit, indem er die Lorentztransformation auf die Mechanik ausdehnte. Er zeigte zudem, dass im Grenzfall kleiner Geschwindigkeiten (viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit) die Lorentztransformation in die Galileitransformation übergeht. Diese bleibt also im Bereich unserer »alltäglichen« Physik anwendbar.

Die Folgen der Speziellen Relativitätstheorie

Längenkontraktion und Zeitdilatation sind Konsequenzen dieses revolutionären Schritts: Eine Messung an einem bewegten Objekt liefert kürzere Abmessungen als eine Messung in dessen Ruhesystem. Ein Vorgang in einem bewegten System beansprucht mehr Zeit als bei einer Messung in seinem Ruhesystem.

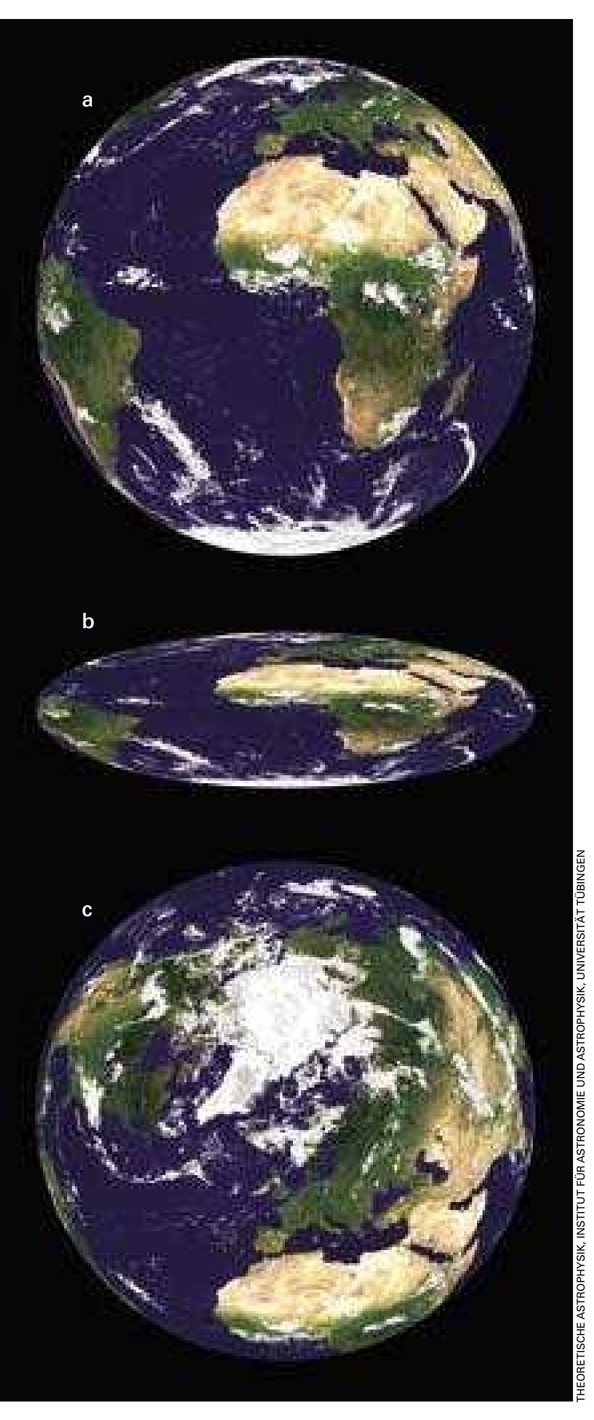
Geschwindigkeiten kann man nicht mehr – wie im Alltag gewohnt – einfach addieren. Jeder Beobachter misst für die Ausbreitung von Licht (und anderen masselosen Phänomenen wie Gravitationswellen) im Vakuum die gleiche konstante Geschwindigkeit – unabhängig vom Bewegungszustand der Quelle oder des Beobachters. In zahlreichen Experimenten haben Physiker diesen Befund bestätigt. Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist also eine universelle Naturkonstante.

Mit seiner Speziellen Relativitätstheorie hat Albert Einstein das Relativitätsprinzip universell und widerspruchsfrei ▷

IN KÜRZE

▶ Die **verblüffenden Effekte** der Speziellen und der Allgemeinen Relativitätstheorie liegen jenseits unserer Alltagserfahrung, was ihr Verständnis erschwert.

▶ Mit modernen Computern lassen sich diese Phänomene sichtbar machen. Eine solche **Visualisierung** ist nicht nur didaktisches Hilfsmittel, sondern liefert auch dem Fachwissenschaftler tiefere Einsichten in die Relativitätstheorie.



Verzerrtes Weltbild: Würden wir mit 95 Prozent der Lichtgeschwindigkeit an der Erde (a) vorbeifliegen, sollte sie gemäß der Speziellen Relativitätstheorie in Flugrichtung – hier parallel zur Erdachse – stark verkürzt erscheinen (b). Der Einfluss dieser Längenkontraktion wird jedoch durch die Auswirkungen der endlichen Lichtlaufzeit weit gehend kompensiert: Der Umriss unseres Heimatplaneten bliebe kreisförmig, doch seine Oberfläche wäre seltsam verzerrt – wir könnten sogar Bereiche von der Rückseite der Erde sehen (c).

▷ neu formuliert. Es zählt stets die relative Geschwindigkeit zwischen Objekt und Beobachter – es ist weder nötig noch sinnvoll oder überhaupt möglich anzugeben, wer ruht und wer sich »wirklich« bewegt.

Bisher haben wir nur die geometrischen Veränderungen gezeigt, die das Bild eines schnell bewegten Gegenstands erfährt. Zwei weitere relativistische Effekte sind der Dopplereffekt und der Searchlight-Effekt. Der Dopplereffekt ist uns in seiner akustischen Variante bereits vertraut: Nähert sich ein Einsatzfahrzeug mit großer Geschwindigkeit, ist der Ton seiner Sirene zu höheren Frequenzen verschoben, entfernt es sich wieder, wird der Ton sehr viel tiefer. Das Gleiche passiert mit der Frequenz des Lichts, das von einem Gegenstand stammt, der sich mit hoher Geschwindigkeit auf uns zu bewegt: Vor allem in der Mitte des Bilds erkennen wir eine starke Verschiebung zu blauen Farben hin. Entfernt sich das Objekt von uns, sehen wir es dagegen stark nach Rot verschoben (siehe Bild auf S. 60 unten links).

Der Searchlight-Effekt beruht teilweise auf der Aberration der Lichtstrahlen. Aberration bedeutet, dass Lichtstrahlen bei schneller Bewegung überwiegend von vorne kommen. Auch dieser Effekt hat eine Analogie im Alltag: Fährt man schnell durch fallenden Schnee, so scheinen die Schneeflocken hauptsächlich von vorne zu kommen, obwohl sie tatsächlich (bei Windstille) gleichmäßig von oben nach unten sinken. Da die Lichtstrahlen also gewissermaßen gebündelt werden, ist der unmittelbar vor einem liegende Teil des Bilds erheblich heller als seitliche Teile (siehe Bild auf S. 60 unten rechts) oder gar das Bild bei einem Blick nach hinten.

Nicht nur der Raum, auch die Zeit ist bei Einstein nicht mehr, was sie bei Newton einmal war. Was die Längenkontraktion für den Raum, das ist die Zeitdilatation für die Zeitdimension der vierdimensionalen Raumzeit: Der Zeitablauf in einem bewegten System erscheint um den gleichen Faktor verlangsamt, wie er auch in der Gleichung für die Längenkontraktion auftritt. Dies sieht man sehr schön an Myonen, die in rund 10 Kilometer Höhe durch die kosmische Höhenstrahlung erzeugt werden. Diese kurzlebigen Partikel bewegen sich fast mit Lichtgeschwindigkeit. Da sie eine mittlere Lebensdauer von 2,2 Mikrosekunden haben, würde man erwarten, dass die Myonen im Mittel etwa 660 Meter weit kommen, bevor sie wieder zerfallen. Gleichwohl lässt sich noch am Erdboden eine relativ große Zahl von Myonen nachweisen. Tatsächlich ist die Flugzeit eines Myons, würde sie im Bezugssystem der Erde gemessen, erheblich länger; im Bezugssystem des Myons ist wegen der Zeitdilatation aber nur so viel Zeit vergangen, wie es der Lebensdauer des Teilchens entspricht.

Dennoch wird im Bezugssystem des Myons die gleiche Geschwindigkeit relativ zur Erde gemessen. Zwar ist die verstrichene Zeitspanne kürzer; vom System des Myons aus ist jedoch die Erde bewegt, sodass die Entfernung vom Entstehungsort zum Erdboden längenkontrahiert ist und damit um den gleichen Faktor kürzer erscheint wie die verstrichene Zeit.

Dabei ist wichtig, die Bezugssysteme nicht unzulässig zu kombinieren; dies würde unweigerlich zu widersprüchlichen Ergebnissen führen. Bestimmt man etwa im obigen Beispiel die Länge der vom Myon zurückgelegten Strecke im Ruhesystem der Erde (wie man das normalerweise tun wird) und nimmt die Lebensdauer als Obergrenze für die Flugzeit, so folgert man irrtümlich, dass das Myon erheblich schneller als mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs war. Ein gleichermaßen falsches Ergebnis erhält man, wenn man für einen Raumflug – beispielsweise zum 28 000 Lichtjahre entfernten Zentrum unseres Milchstraßensystems – die von der Erde aus gemessene Entfernung durch die im Raumschiff gemessene Reisezeit dividiert.

Relativistische Lichtablenkung in der Allgemeinen Relativitätstheorie

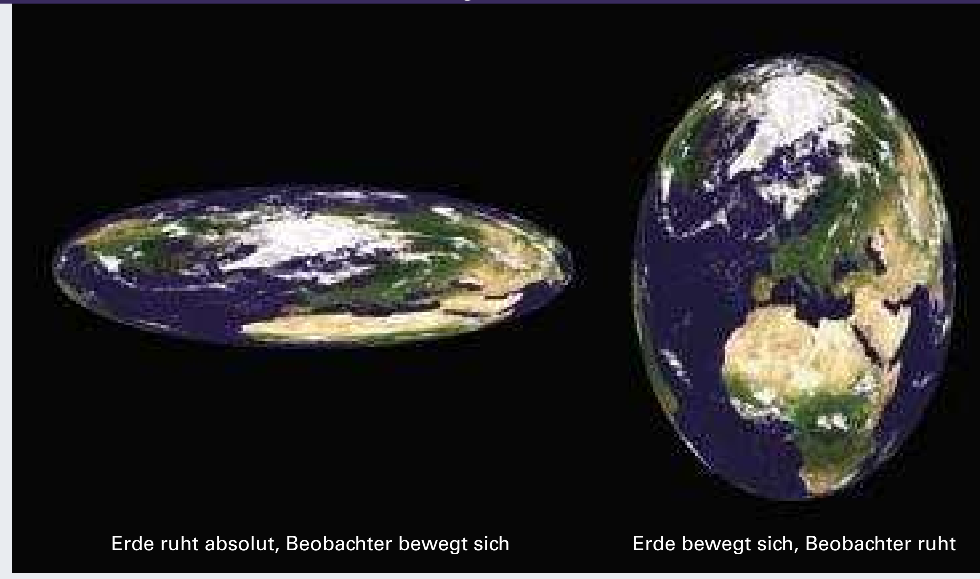
Auch die Allgemeine Relativitätstheorie – die korrekte Beschreibung der Gravitation – hält eine erstaunliche Fülle von optisch eindrucksvollen Kuriositäten bereit. Eine Bewegung des Objekts relativ zum Beobachter ist dabei nicht erforderlich. Ursache der Verzerrungen ist vielmehr die relativistische Lichtablenkung, also der Umstand, dass sich Lichtstrahlen nicht mehr auf Geraden im Raum ausbreiten. In der Allgemeinen Relativitätstheorie werden nicht nur die Bahnen massiver Körper durch andere Massen beeinflusst, sondern auch die Bahnen von Photonen, also den Lichtquanten.

Mathematisch gesprochen: Photonen, ebenso wie massive Körper, bewe- ▷

Unterschiedliche Perspektiven – verschiedene Ergebnisse?

Eines der Hauptprobleme der Physik im ausgehenden 19. Jahrhundert war, dass sich die Grundgleichungen der Elektrodynamik – die Maxwell-Gleichungen – nicht mit der newtonschen Mechanik vertrugen. Dies führte zu unterschiedlichen Ergebnissen, je nachdem, ob der Beobachter oder das beobachtete Objekt als bewegt angesehen wurde.

Hätte ein Physiker vor Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie ein Bild im Bezugssystem der Erde berechnet und das Ergebnis auf einen Beobachter transformiert, der sich mit 95 Prozent der Lichtgeschwindigkeit relativ zu ihr bewegt, hätte er eine Stauchung der Erde in Bewegungsrichtung erwartet (links). Für das Bild einer bewegten Erde im Bezugssystem des Beobachters hätte der gleiche Wissenschaftler hingegen ein völlig anderes Ergebnis erhalten (rechts).



Prinzipiell bestünde somit die Möglichkeit, durch Messungen nachzuprüfen, welches der beiden Ergebnisse richtig ist. Dies widerspräche aber dem Relativitätsprinzip, das schon lange vor Einstein bekannt war und dem zufolge es unmöglich ist, einen absoluten Bewegungs- oder Ruhezustand für ein physikalisches System anzugeben.

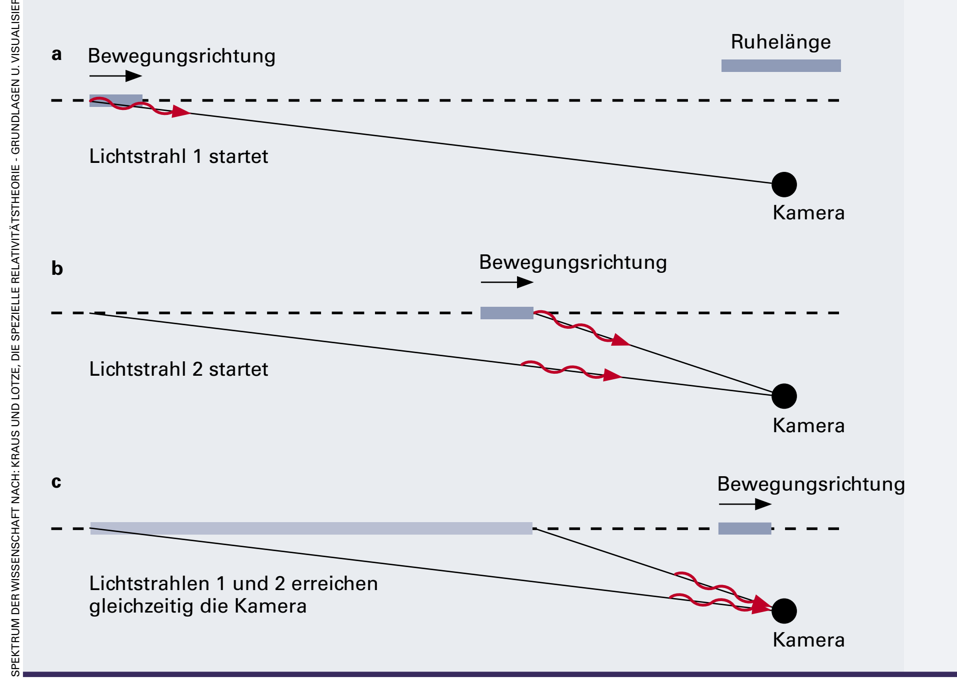
THEORETISCHE ASTROPHYSIK, INSTITUT FÜR ASTRONOMIE UND ASTROPHYSIK, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

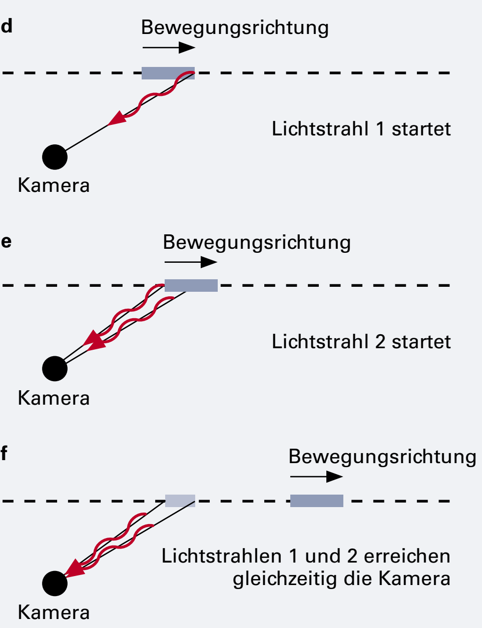
Kuriose Folgen der endlichen Lichtgeschwindigkeit

Angenommen, ein dünner Stab bewegt sich mit 90 Prozent der Lichtgeschwindigkeit in Richtung seiner Längsachse auf eine Kamera zu. Das Bild, das die Kamera aufzeichnet, entsteht aus Lichtstrahlen, die gleichzeitig eintreffen.

Der Lichtstrahl vom fernen Ende des Stabs ist jedoch zu einem früheren Zeitpunkt gestartet (a) als der Strahl vom näheren Ende (b). Da sich der Stab während dieses Zeitintervalls weiter bewegt hat, erscheint sein Abbild, das die Kamera aufnimmt, länger als die Ruhelänge des Stabs selbst (c). Die Längenkontraktion ist auf dem entstandenen Bild überhaupt nicht zu sehen.

Entfernt sich der Stab mit 90 Prozent der Lichtgeschwindigkeit von der Kamera, ist wiederum der Lichtstrahl vom fernen Ende des Stabs früher gestartet (d) als der Strahl vom näheren Ende (e). Das Abbild ist nun aber kürzer als die Ruhelänge des Stabs (f). Die Verkürzung ist deutlich stärker als der Effekt der Längenkontraktion alleine.

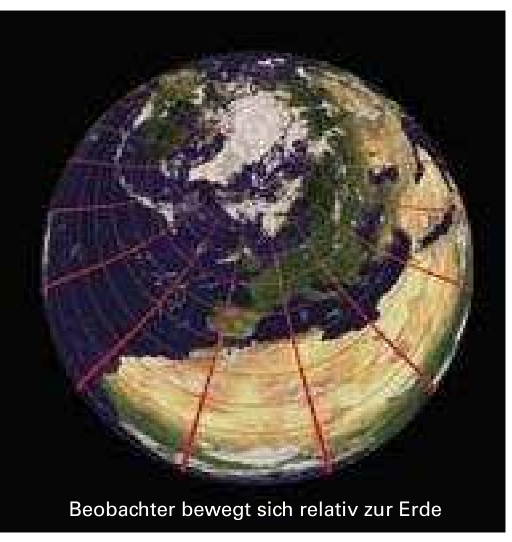




SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT NACH: KRAUS UND LOTZE, DIE SPEZIELLE RELATIVITÄTSTHEORIE - GRUNDLAGEN U. VISUALISIERUNG, AULIS VERLAG DEUBNER


Beobachter ruht relativ zur Erde

BEIDE: THEORETISCHE ASTROPHYSIK, INSTITUT F. ASTRONOMIE U. ASTROPHYSIK, UNIV. TÜBINGEN


Beobachter bewegt sich relativ zur Erde

Als einzige geometrische Körper verändern Kugeln ihren Umriss nicht, wenn sie von einem relativ zu ihnen bewegten Beobachter betrachtet werden. Allerdings erscheint die Oberfläche verzerrt. Hier ist der Anblick der Erde aus 2000 Kilometer Höhe gezeigt. Gegenüber der normalen Ansicht (links) erscheint die Oberfläche verformt, wenn sich der Beobachter mit 99,9 Prozent der Lichtgeschwindigkeit in Richtung der Polachse bewegt (rechts).

gen sich auf so genannten Geodäten der Raumzeit. In einer gekrümmten Raumzeit spielen Geodäten die gleiche Rolle wie Geraden in einer euklidischen Raumzeit (also einem flachen Raum mit einer unabhängigen, überall gleich ablaufenden Zeit): Sie sind die kürzesten Verbindungen zwischen zwei Punkten. Die Krümmung der Raumzeit wird ihrerseits von allen vorhandenen Massen hervorgerufen.

Historisch lieferte die Ablenkung von Lichtstrahlen, die nahe an der Sonne vorbeilaufen, eine der ersten Möglichkeiten, die Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie zu überprüfen. Die Gelegenheit dazu bot sich bei der totalen Sonnenfinsternis von 1919; der von Einstein vorhergesagte Wert von 1,75 Bogensekunden am Sonnenrand konnte bestätigt werden (siehe Spektrum der Wissenschaft 12/1992, S. 82).

Auch in der newtonschen Gravitationstheorie kann man die Bahn eines Teilchens berechnen, das sich mit Lichtgeschwindigkeit am Sonnenrand vorbeibewegt. Das Ergebnis hängt nicht von der Ruhemasse des Teilchens ab, es sollte demnach auch für Photonen gelten. Man erhält aber nur die Hälfte des Werts, den man auf Grund der Allgemeinen Relativitätstheorie bestimmt. Die Messung von 1919 erlaubte es also, zwischen den Vorhersagen der beiden Theorien zu entscheiden. Sie bestätigte, dass Einsteins und nicht Newtons Theorie die Gravitation korrekt beschreibt, und begründete damit Einsteins weltweiten Ruhm.

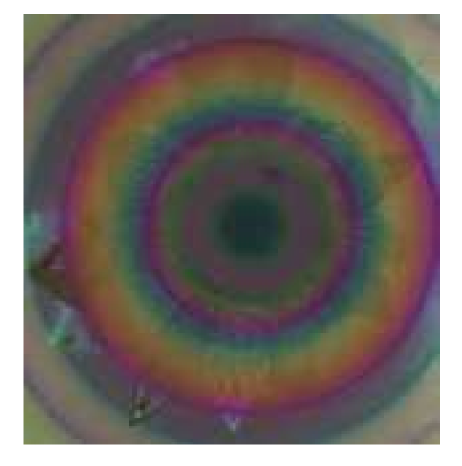
Schwarze Löcher als Gravitationslinsen

Mittlerweile lässt sich mit Radioteleskopen sogar die Lichtablenkung am Rand der Erde nachweisen, obwohl diese nur 0,000 575 Bogensekunden beträgt. Mit bloßem Auge lassen sich solch geringe Ablenkungen natürlich nicht erkennen. Deutlich sichtbar wird der Effekt aber, wenn wir die Ablenkung des Lichts an einem sehr kompakten Objekt hoher Masse, etwa einem Schwarzen Loch oder einem Neutronenstern, betrachten.

Schauen wir also wieder auf unsere wohlbekannte Erde, wobei wir diesmal ein Schwarzes Loch – mit ausreichendem Sicherheitsabstand – vor der Erde vorbeiziehen lassen. Nähert sich das Schwarze Loch der Sichtlinie, wird das Bild zunächst in ähnlicher Weise verzerrt, als befände sich eine Linse zwischen Erde und Betrachter (siehe Kasten rechts). Nicht von ungefähr sprechen die Physiker von Gravitationslinsen – wobei nicht nur Schwarze Löcher, sondern auch Sterne, Galaxien und sogar ganze Galaxienhaufen eine solche Linsenwirkung haben können. Befindet sich das Schwarze Loch schließlich genau auf der Linie zwischen Erde und Betrachter, so entsteht eine ringförmige Struktur, da nun Lichtstrahlen auf allen Seiten um das Schwarze Loch herum zum Betrachter gelenkt werden können (siehe Kasten rechts). Einstein hatte dies 1936 vorausgesagt, deshalb bezeichnen die Physiker ein solches ringförmiges Bild auch als Einsteinring.

Nicht nur die Erde rotiert um ihre eigene Achse – alle Sterne im Universum, selbst Schwarze Löcher, tun dies. In der newtonschen Gravitationstheorie hat ▷

Gleiche Perspektive wie im Bild auf S. 56 beim Anflug auf Tübingen, hier jedoch unter Berücksichtigung des Dopplereffekts (links) beziehungsweise des Searchlight-Effekts (rechts).





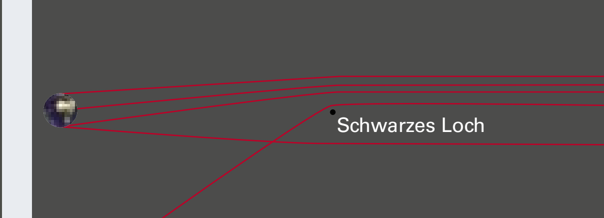
BEIDE: THEORETISCHE ASTROPHYSIK, INSTITUT FÜR ASTRONOMIE UND ASTROPHYSIK, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

Mehrfachbilder und Einsteinringe









ALLE BILDER DIESER SEITE: THEORETISCHE ASTROPHYSIK, INSTITUT FÜR ASTRONOMIE UND ASTROPHYSIK, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

Lichtstrahlen, die an einem Schwarzen Loch vorbeilaufen, werden umso stärker abgelenkt, je näher sie dem Schwerkraftzentrum kommen (Grafik rechts unten).

Ein Schwarzes Loch mit der 326-fachen Masse unserer Sonne durchquert den Bereich zwischen Erde und Beobachter (linke Bildfolge). Nahe der Sichtlinie zur Erde wird die Ablenkung so stark, dass Lichtstrahlen nicht nur rechts, sondern auch links um das Schwarze Loch herum den Betrachter erreichen – es erscheint ein zweites, spiegelbildliches Abbild der Erde. Im Bild bleibt ein kreisförmiger Bereich um das Schwarze Loch ausgespart, weil Lichtstrahlen, die in diesem Bereich auftreffen, nicht von der Erde kommen. Der Beobachter ist jeweils 830000 Kilometer von der Erde entfernt, das Schwarze Loch 240000 Kilometer.

Ein so genannter Einsteinring (mittlere Bildfolge) entsteht, wenn sich die Gravitationslinse – hier jeweils ein Schwarzes Loch mit von oben nach unten zunehmender Masse – genau auf der Sichtlinie zwischen Erde und Beobachter befindet. Infolge der Symmetrie werden Lichtstrahlen auf allen Seiten um das Schwarze Loch herumgelenkt. Die Abstände sind die gleichen wie in der Bildfolge links.

Rotiert das Schwarze Loch, wird die Symmetrie des Einsteinrings gestört (rechte Bildfolge). Der Unterschied zum nicht rotierenden Fall ist recht gering. In den beiden gezeigten Fällen entspricht die Rotationsgeschwindigkeit dem maximalen Wert, den die Relativitätstheorie erlaubt; im unteren Bild rotiert das Schwarze Loch entgegengesetzt zum oberen.

Blick auf die Rückseite einer Kugel

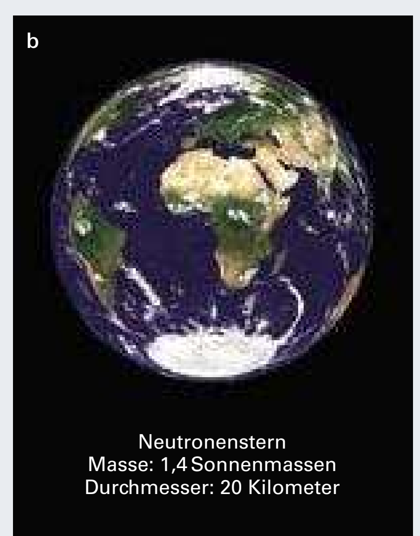
Je kompakter ein Himmelskörper, desto stärker ist die von ihm verursachte Lichtablenkung. Um das Phänomen zu illustrieren, hat unsere Arbeitsgruppe einen typischen Neutronenstern mit der Struktur der Erdoberfläche versehen. Während ein Beobachter von der Erde nur Oberflächenstrukturen wahrnimmt, die ihm zugewandt sind (a), könnte er von einem Neutronenstern auch Teile der Sternoberfläche sehen, die eigentlich hinter dem Horizont liegen (b).

Ursache ist die starke Gravitation, die Lichtstrahlen teilweise um den Stern herumbiegt (d). Auf der fiktiven Neutronensternoberfläche wäre beispielsweise Australien am rechten unteren Bildrand zu sehen, obwohl dieser »Kontinent« auf der dem Beobachter abgewandten Seite des Sterns liegt.

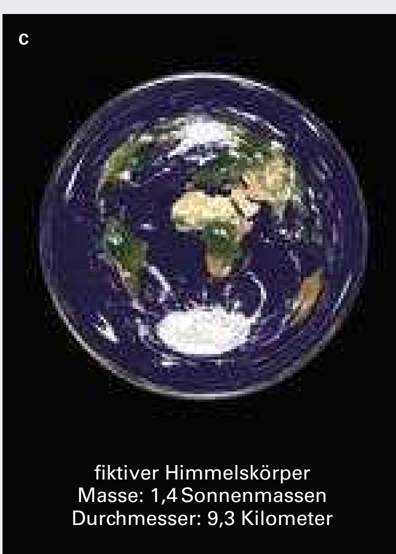
Das kompakteste Objekt mit der Masse eines Neutronensterns, das gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie noch zulässig ist, ohne dass der Druck im Zentrum unendlich groß wird, hätte einen Durchmesser von 9,3 Kilometern. (Allerdings kommt ein solches Objekt in der Natur nicht vor, da keine Materieform einen stabilen Zustand erlauben würde.) Die Lichtablenkung wäre dann so stark, dass die gesamte Oberfläche des Himmelskörpers sichtbar wäre, und zwar sogar mehrfach (c). Australien ist nicht nur unten rechts, sondern auch am oberen linken Bildrand zu erkennen.


a

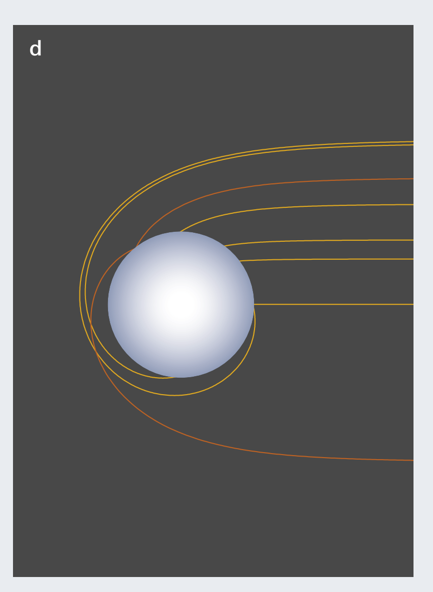
Erde
Masse: $3 \cdot 10^{-6}$ Sonnenmassen
Durchmesser: 12 700 Kilometer


b

Neutronenstern
Masse: 1,4 Sonnenmassen
Durchmesser: 20 Kilometer


c

fiktiver Himmelskörper
Masse: 1,4 Sonnenmassen
Durchmesser: 9,3 Kilometer


d

THEORETISCHE ASTROPHYSIK, INSTITUT FÜR ASTRONOMIE UND ASTROPHYSIK, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

▷ die Rotation keinen Einfluss auf das Gravitationsfeld, das von einem Stern erzeugt wird. Anders in Einsteins Relativitätstheorie: Hier entsteht ein Mitführungseffekt, der so genannte Lense-Thirring-Effekt, der die Bahnen von massiven Objekten wie auch von Photonen beeinflusst. Je nach Rotationsgeschwindigkeit und -richtung entsteht also beim Betrachter ein anderes Bild als ohne Rotation, wenn die Lichtstrahlen, die das Bild aufbauen, nahe an einem kompakten, rotierenden Objekt vorbeigelaufen sind (siehe Kasten auf S. 61 rechts).

Doch selbst bei einem so extremen Objekt wie einem Schwarzen Loch, das mit maximal möglicher Geschwindigkeit rotiert, ist der Mitführungseffekt nur schwach zu erkennen. Hochpräzise Beobachtungsinstrumente vermögen aber inzwischen sogar solch winzige Effekte nachzuweisen. Der Satellit Gravity Probe B befindet sich seit April 2004 in einer Umlaufbahn um die Erde, um sogar den noch viel schwächeren Mitführungseffekt durch die Rotation der Erde mit einer Genauigkeit von einem Prozent direkt zu messen.

Nur im Rechner möglich: Neutronenstern in der Haut der Erde

Da ein Schwarzes Loch selbst kein Licht ausstrahlt, kann man es nicht sehen: Beim Beobachter kommen nur Lichtstrahlen an, die von anderen Objekten emittiert wurden und am Schwarzen Loch vorbeigelaufen sind – jedoch keine, die den Horizont durchquert hätten, also aus dem Loch selbst herausgekommen wären. Für einen Neutronenstern verhält es sich anders: Lichtstrahlen können sehr wohl von der Oberfläche des Sterns emittiert werden und einen fernen Beobachter erreichen. Dies ist zwar astrophysikalisch sehr interessant, visuell aber eher langweilig, da die Oberfläche eines Neutronensterns kaum strukturiert ist.

Wir verabschieden uns darum von der real existierenden Erde als Anschauungsobjekt und wenden uns einer fiktiven Erde zu, die zwar noch die bekannten Kontinente zeigt, dabei aber die Masse und den Radius eines Neutronensterns aufweist. Ein realer Neutronenstern entsteht als Endprodukt eines massereichen Sterns, wenn dieser seinen Brennstoffvorrat aufgebraucht hat; er stellt die kompakteste Form eines Objekts aus Materie dar, die in der Natur

Wurmloch als »Kristallkugel«


a Blick nach Südwesten


b Blick nach Westen


c Blick nach Nordwesten

THEORETISCHE ASTROPHYSIK, INSTITUT FÜR ASTRONOMIE UND ASTROPHYSIK, UNIVERSITÄT TÜBINGEN


d Blick nach Osten


e Blick von oben


f Blick zurück nach Osten

Ein Wurmloch auf dem Tübinger Marktplatz sähe von allen Seiten kugelförmig aus. Die Lichtstrahlen würden ähnlich wie bei einem Schwarzen Loch abgelenkt werden, sodass bei einem Rundgang um das Wurmloch die dahinter stehenden Häuser verzerrt erschienen (a bis d). Ferner würde sich in gleicher Weise die Blickrichtung im Innern des Wurmlochs ändern, wo der Blick von der anderen Seite des Wurmlochs ins Weltall hinausgeht.

Stünde dieses andere Ende ungefähr im Abstand des Monds vor der Erde, so könnten wir von Tübingen aus in einer Richtung auf unseren Heimatplaneten und die dahinter liegende Milchstraße sehen (b); in der Gegenrichtung schauten wir von der Erde weg, sähen sie aber noch als Ring, der das gesamte Universum einschließt (d). Am Blick von oben auf das Wurmloch lässt sich erkennen, dass ein solches Gebilde nicht eine in irgendeine bestimmte Richtung führende Röhre ist (e). Könnten wir das Wurmloch durchqueren, ließe sich von der anderen Seite zurück in die Tübinger Altstadt blicken (f).

möglich ist (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2004, S. 34).

Ein solcher Neutronenstern weist ungefähr das 1,4-fache der Sonnenmasse auf – die allerdings auf einen Ball von nur etwa 20 Kilometer Durchmesser komprimiert ist. An der Oberfläche eines derart kompakten Himmelskörpers herrscht eine enorm starke Gravitation, die dafür sorgt, dass jede Unregelmäßigkeit eingeebnet wird. Ein Neutronenstern ist also fast vollkommen glatt und weist deshalb keine Struktur auf, die sich für eine Visualisierung eignen würde. Aus diesem Grund versehen wir für unsere Zwecke einen solchen Neutronenstern im Computer mit der vertrauten Oberflächenstruktur der Erde – so, als würde er in der Haut unseres Heimatplaneten stecken.

Um die Ecke gesehen

Der Effekt ist eindrucksvoll: Wegen der starken Gravitation werden die Lichtstrahlen durch die Lichtablenkung gewissermaßen um den Stern herumgelenkt. Es erreichen daher auch Strahlen von Teilen der Rückseite des Sterns den Beobachter – ohne Lichtablenkung wäre dies nicht möglich (siehe Kasten links). Treiben wir das Spiel noch ein wenig weiter, indem wir die Masse des Sterns so weit erhöhen und zugleich den Radius so weit verringern, wie es im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie überhaupt möglich ist. Lichtstrahlen könnten ein solch fiktives Objekt nun komplett umrunden und – von der Rückseite ausgehend – sowohl »rechts« als auch »links« herum zum Beobachter gelangen.

Neutronensterne und Schwarze Löcher mögen uns als fantastische Gebilde erscheinen. Doch ist inzwischen so gut wie sicher, dass es sie in unserem Universum gibt – und nicht einmal als beson- ▷

dere Ausnahmeerscheinung. Damit nicht genug, haben sich Sciencefictionautoren immer wieder von Einsteins Relativitätstheorie zu noch ausgefalleneren Fantasien inspirieren lassen; manchmal mehr, manchmal weniger in Übereinstimmung mit der korrekten Theorie. Betrachten wir zwei dieser Konstrukte: Wurmlöcher und Warpantrieb. Beide dürften zwar auch in ferner Zukunft nicht realisierbar sein; sie sind aber durch die Allgemeine Relativitätstheorie zumindest nicht grundsätzlich ausgeschlossen.

Will man als Sciencefictionautor eine Zivilisation beschreiben, die sich über einen größeren Bereich als beispielsweise ein Sonnensystem erstreckt, stößt man sofort auf das Problem der riesigen Entfernungen und damit der langen Zeitspannen, die für Reisen wie auch für das Übertragen von Nachrichten benötigt würden. Mit Zeitspannen im Bereich von Wochen sind zwar schon die alten Römer durchaus klargekommen – hier geht es jedoch um Jahrzehnte bis Jahrtausende.

Dies gilt zwar zunächst nur für die daheim Gebliebenen: Für die Reisenden im Raumschiff ist eine Reise zum Zentrum unseres Milchstraßensystems und zurück dank der speziell-relativistischen Zeitdilatation grundsätzlich durchaus in gut 40 Jahren zu bewältigen – währenddessen sind aber auf der Erde ungefähr 56 000 Jahre vergangen. Dieses Synchronizitätsproblem dürfte den Aufbau einer interstellaren Zivilisation vor große organisatorische Probleme stellen – man stelle sich nur einmal die Auswirkungen auf ein Rentenversicherungssystem vor!

Kein Grund zum Verzagen, die Allgemeine Relativitätstheorie hält Alternativen bereit! Sehr beliebt im Katalog futuristischer Reiseveranstalter sind Wurmlöcher, die als eine Art Abkürzung zwischen weit entfernten Punkten unseres Universums dienen oder sogar zwei ansonsten vollkommen getrennte Universen verbinden können. Der Begriff ist leider etwas irreführend: Ein Wurmloch ist nämlich keine röhrenartige Konstruktion. Es besteht eher aus zwei kugelförmigen Gebilden – eines in jeder der beiden Welten –, die von außen eine ähnliche räumliche Geometrie aufweisen wie ein Schwarzes Loch. Diese Gebilde hängen so ineinander, dass man, wenn man sich auf das vermeintliche Schwarze Loch zu bewegt, irgendwann nicht mehr weiter nach innen gelangt, sondern sich vielmehr in der anderen Welt wieder nach außen bewegt. Die beiden Umgebungen um das Wurmloch herum können dabei an verschiedenen Orten im gleichen Universum liegen, oder sie können sich in zwei getrennten Universen befinden. Das Durchqueren eines Wurmlochs erfordert keine besonders lange Zeit, und auch außerhalb des Wurmlochs vergeht nicht mehr Zeit als für den Reisenden (die Details sind allerdings von der genauen Struktur des Wurmlochs abhängig; so könnten Wurmlöcher möglicherweise sogar einer Reise in die Vergangenheit dienen). Man wird hier also nicht nur das Problem der langen Reisezeit, sondern auch das der Synchronizität los.

Angenommen, ein Ende eines solchen Wurmlochs befände sich mitten auf dem Marktplatz von Tübingen, das andere hingegen im Weltall, von der Erde ungefähr so weit entfernt wie der Mond. Das Tübinger Wurmloch hätte eine kugelförmige Gestalt; man könnte es aus allen Raumrichtungen gleichermaßen »betreten« (siehe Kasten auf S. 63).

Mit Warpantrieb überlichtschnell durchs All

Da das Wurmloch in seiner Umgebung die gleiche räumliche Struktur aufweist wie ein Schwarzes Loch, werden Lichtstrahlen in ähnlicher Weise verbogen wie in der Umgebung eines Schwarzen Lochs. Der geneigte Leser ist daher sicher auch nicht mehr sonderlich überrascht, dass er in einem ringförmigen Bereich um das Wurmloch herum wieder das Bild seines gesamten Universums sieht. Anders als beim Schwarzen Loch gibt es hier aber keinen Horizont, vielmehr sieht man im inneren Bereich die Umgebung auf der anderen Seite des Wurmlochs. Auch hier hat man einen umfassenden, nichts auslassenden Rundumblick.

Wurmlöcher eignen sich zwar gut für Reisen zu vorher bestimmten Punkten – ungeeignet sind sie aber für den Individualreisenden, der seine Reiseroute spontan wählt, oder gar für eine Forschungsmission *»to boldly go where no man has gone before«*.

Ein Hauch von Star Trek: Von einem Raumschiff, das in einer Warp-Blase eingeschlossen ist und sich mit dem 1,1-fachen der Lichtgeschwindigkeit durchs All bewegt, böte sich ein interessanter Ausblick. (a): Blick in Flugrichtung beim Anflug auf die Erde; (b): Blick nach hinten beim Wegflug von der Erde. Befände sich die Warp-Blase – eine Verzerrung der Raumzeit – zwischen Erde und Beobachter, würde das Licht abgelenkt und das Bild deformiert (c).

INSTITUT FÜR VISUALISIERUNG UND INTERAKTIVE SYSTEME, UNIVERSITÄT STUTTGART



Zum Glück gibt es da noch das Warp-Triebwerk: Hier wird nicht das Raumschiff relativ zu seiner Umgebung beschleunigt, vielmehr wird ein Teil dieser Umgebung mit dem Raumschiff darin innerhalb der gesamten Raumzeit verschoben. In Vorwärtsrichtung wird der Raum gestaucht, hinter dem Raumschiff gedehnt. Auf diese Weise können beliebig hohe Geschwindigkeiten erreicht werden, da die Beschränkung auf die Lichtgeschwindigkeit nur für Bewegungen relativ zur Umgebung gilt, nicht aber für Verzerrungen der Raumzeit selbst. Die Reise benötigt zwar noch eine gewisse Zeit, die von der Geschwindigkeit der Verzerrung abhängig ist, aber immerhin vergeht die Zeit innerhalb der Warp-Blase genauso schnell wie außerhalb. Als Bonus ist die Besatzung des Raumschiffs keinen Trägheitskräften als Folge hoher Beschleunigung ausgesetzt (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2000, S. 36).

Die technischen Probleme bei der Realisierung solcher Reisepläne sollen nicht verschwiegen werden: Für die mittlerweile wohl eher konventionell anmutenden Variante einer speziell-relativistischen, fast lichtschnellen Reise stößt man vor allem auf das Treibstoffproblem: Ein Photonentriebwerk mit Materie-Antimaterie-Treibstoff, das die denkbar günstigste Ausnutzung des Treibstoffs erlaubt, würde für die oben erwähnte Reise zum Zentrum des Milchstraßensystems allein für die Beschleunigungsphase während des Hinflugs das 30000-fache der Masse von Raumschiff plus Ladung benötigen. Das Abbremsen am Zielort erforderte erneut einen entsprechenden Treibstoffaufwand. Und da der für das Abbremsen benötigte Treibstoff zunächst mit beschleunigt werden müsste, bräuchte man insgesamt eine Menge an Materie-Antimaterie-Treibstoff, die fast dem Milliardenfachen der Masse des beladenen Raumschiffs entspräche.

Sciencefiction und Wirklichkeit

So gewaltig diese Anforderungen sind, so erscheinen sie doch fast banal im Vergleich zu der Herausforderung, ein stabiles Wurmloch zu betreiben, das einem Raumschiff als Abkürzung auf dem Weg zu fernen Welten dienen könnte. Es ist durchaus denkbar, dass Wurmlöcher auf natürlichem Wege entstehen oder entstanden sind – beispielsweise während des Urknalls. Ein solches natürliches Wurmloch wäre jedoch nicht stabil; es zöge sich so schnell zusammen, dass ein Raumschiff keine Chance hätte, es zu durchqueren. Wer es dennoch probierte, würde unweigerlich von dem kollabierenden Wurmloch in der Singularität zerquetscht.

Andererseits bietet die Allgemeine Relativitätstheorie die Möglichkeit, ein stabiles Wurmloch zunächst zu postulieren und dann die Feldgleichungen gewissermaßen rückwärts zu benutzen, um herauszufinden, welche Verteilung von Materie man bereitstellen müsste, um die Existenz eines solchen Wurmlochs zu sichern. Das Ergebnis einer solchen Rechnung enthält aber eine unangenehme Überraschung: Erforderlich ist Materie mit negativer Energie (oder negativer Masse). Solche Materie ist in unserer Alltagswelt vollkommen unbekannt. In dem nach wie vor recht dunklen Bereich, in dem sich Relativitätstheorie und Quantentheorie treffen, kann solche Materie aber wahrscheinlich vorkommen – dummerweise allerdings nur in Verbindung mit riesigen Mengen an Materie mit positiver Energie. Schon ein kleines Wurmloch mit etwa einem Meter Durchmesser benötigt so viel Energie, wie zehn Milliarden Sonnen in einem Jahr abstrahlen. Von den technischen Schwierigkeiten, solche ungeheure Mengen in die erforderliche Form zu bringen, wollen wir hier erst gar nicht reden …

Der Warpantrieb böte hier leider keinen Ausweg: Auch dafür wäre Materie mit negativer Energie nötig. Darüber hinaus könnte ein solcher Antrieb möglicherweise gar nicht von dem Raumschiff selbst gesteuert werden, und vielleicht könnte das Raumschiff nicht einmal selbständig in die Warp-Blase eintreten oder sie verlassen.

Die letzten Bemerkungen haben uns nun auf den harten Boden der Tatsachen zurückgeführt. So schade es auch sein mag, dass die von der Relativitätstheorie grundsätzlich erlaubten, fantastischen Möglichkeiten für Reisen durchs Weltall wohl nie Realität werden können – umso erfreulicher ist es doch, dass uns moderne Computer die Möglichkeit geben, wenigstens die visuellen Eindrücke einer solchen Reise zu genießen. Dabei ist nicht nur der erforderliche Aufwand unvergleichlich geringer, diese Möglichkeit steht zudem allen zur Verfügung und ist nicht auf die wenigen Besatzungsmitglieder eines Raumschiffs beschränkt. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



Das Visualisierungsteam des Sonderforschungsbereichs 382: Marc Borchers, Daniel Weiskopf, Hanns Ruder, Ute Kraus, Hans-Peter Nollert, Michael Zatloukal und **Thomas Müller** (von links). Ruder ist Professor für Theoretische Astrophysik an der Universität Tübingen und Sprecher des SFB 382 »Verfahren und Algorithmen zur Simulation physikalischer Prozesse auf Höchstleistungsrechnern«, an dem auch die Universität Stuttgart beteiligt ist. Nollert ist Privatdozent an der Universität Tübingen.

Fast lichtschnell durch die Stadt: Visualisierung relativistischer Effekte. Von U. Kraus und M. Borchers in: Physik in unserer Zeit, Bd. 36, Heft 2, S. 64, 2005

Was Einstein noch nicht sehen konnte. Von U. Kraus et al. in: Physik-Journal, Bd. 1, Heft 7, S. 77, 2002

Einsteins Ideen. Das Relativitätsprinzip und seine historischen Wurzeln. Von B. Hoffmann. Spektrum Akademischer Verlag, 1997

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

»Jugend forscht« – der 40. Bundeswettbewerb (I)

Das mittlerweile traditionsreiche Kreativitätsturnier beeindruckt durch bunte Vielfalt, originelle Ideen und teilweise professionelle Qualität.

Von Christoph Pöppe

Wer wissenschaftlich arbeiten möchte, muss nicht unbedingt ins Genlabor wandern oder Daten vom Weltraumteleskop auswerten. Manchmal steht einem das Problem vor der Nase – auf dem heimischen Küchentisch. Moderne Getränkekartons haben zwar inzwischen die komfortabelsten Verschlüsse, aber man kriegt sie nicht mehr richtig leer. Da jedes Jahr um die drei Milliarden Getränkekartons in Deutschland verkauft werden, addieren sich die verschwendeten Tropfen zu Seen mit einem Volumen von mehreren Millionen Litern.

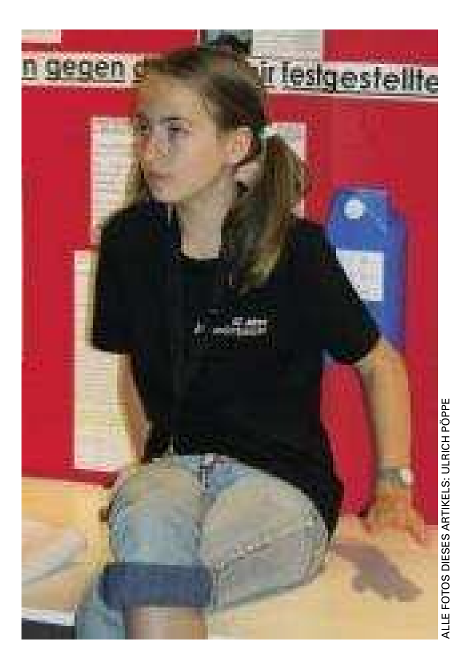
Die Restmenge für verschiedene Verschlussarten durch Versuchsreihen messen und einen eigenen Verschluss entwerfen, der nur noch ein Drittel der bisher geringsten Menge zurückbehält – das ist wissenschaftliche Arbeit, die auch mit den Mitteln eines Jugendlichen zu leisten ist. Jana Böker aus einer Grundschule in Kleinmachnow bei Berlin ist damit im zarten Alter von 12 Jahren in den Bundeswettbewerb »Jugend forscht« gekommen, der vom 27. bis zum 29. Mai in Dortmund ausgetragen wurde. Für einen Preis im Fachgebiet »Arbeitswelt« hat es nicht gereicht; der ging an die Erfinder einer neuen Anordnung der Buchstaben auf der Schreibmaschinen- oder Computertastatur, die nach der Einübungsphase eine um ein Drittel höhere Schreibgeschwindigkeit ermöglichen soll.

Unter den 120 Jungforscherteams, die sich bereits in Regional- und Landeswettbewerben gegen die Konkurrenz aus der Nachbarschaft durchgesetzt hatten, waren Aufgaben aus dem eigenen Umfeld durchaus beliebt. Die Brüder Sven (17) und Simon (14) Loosen aus Korschenbroich bei Mönchengladbach suchten und fanden eine Lösung für ein drängendes Problem ihrer Heimatstadt: Durch großräumige Wasserumleitungen im Rahmen des Braunkohlentagebaus sind zahlreiche Häuser von Grundwassereinbrüchen bedroht.

Pfälzer Saumagen – strahlend

Für Anna Lena Wegmann (19) und Judith Wisser (19) aus der Umgebung von Landau (Pfalz) war es hilfreich, dass einer der Väter Jäger ist und die Jungforscherinnnen mit frischen Wildschweinmägen versorgen konnte. Ihnen gelang es, noch merkliche Reste von Radioaktivität aus der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl (1986) nachzuweisen, insbesondere bei Wildschweinen aus Gebieten, die damals stark betroffen waren, und verstärkt dann, wenn die Tiere während oder kurz nach der Hirschtrüffelsaison erlegt worden waren.

Roman Böttger (18) aus Stollberg (Sachsen) hilft dem Physikunterricht mit einem genial einfachen Gerät zur Erzeugung von Welleninterferenzen auf: In einer kreisförmigen, wassergefüllten Wanne tanzen Styroporkügelchen mit eingesteckten Schwänzchen aus Eisendraht synchron auf und ab, weil eine Ringspule ein homogenes, zeitlich variierendes Magnetfeld erzeugt. Permanentmagneten unter dem Wannenboden halten die kleinen Wellenerzeuger am Platz.



ALLE FOTOS DIESES ARTIKELS: ULRICH PÖPPE

Das Nesthäkchen des Bundeswettbewerbs: Jana Böker (12) untersuchte den Restflüssigkeitsgehalt verschiedener Getränkekartons.

Fünf Bonbons für dich, fünf für mich

Unter den (erwachsenen) Wirtschaftswissenschaftlern ist ein Experiment namens »Ultimatumspiel« berühmt geworden (Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 52): Versuchsperson *A* erhält 100 Euro und darf ansagen, wie dieser Betrag zwischen ihr und Versuchsperson *B* aufgeteilt werden soll. *B* kann diesen Vorschlag annehmen oder ablehnen, in welchem Falle gar nichts ausgezahlt wird. Die Ergebnisse dieses Spiels demonstrieren immer wieder, dass Fairnessgedanken im Verhalten der Menschen eine weit größere Rolle spielen, als den bislang gängigen Denkmodellen der Ökonomie entspricht.

Jeannine Ziegler (18) aus Rappweiler (Saarland) war die erste, die das Ultimatumspiel mit kleinen Kindern (zehn Bonbons statt 100 Euro) gespielt hat; für ihre Arbeit erhielt sie den 2. Preis im Fachgebiet Biologie. Die Ergebnisse sind ein Anlass zum Jubel für jeden, der an das Gute im Menschen – vor allem im

weiblichen Menschen – glaubt: Angebote, die von der fairen Aufteilung (fünf Bonbons für jeden) abweichen, sind selten und werden fast ausschließlich von Knaben abgegeben. Das eröffnet Raum für spekulative Überlegungen: Ist der allenthalben zu beobachtende Egoismus vielleicht nicht eine Konstante der menschlichen Natur, sondern ein – irgendwann in der Jugendzeit – erlerntes Verhalten?

Tödlicher Kautabak

Die Tabakspflanze hat wirklich Pech mit ihrer einzigartigen Verteidigungsstrategie. Nun produziert sie schon das Nervengift Nikotin, um ihre Fressfeinde außer Gefecht zu setzen, und was passiert? Nicht nur die Menschen pflücken, trocknen und verbrennen ihre Blätter wegen eben dieses Nikotins, was immerhin ihrer Verbreitung aufhilft – indirekt –; der Raupe des Tabakschwärmers gelingt es sogar, den Spieß gegen seinen Urheber zu richten – indirekt. Die Raupen kauen Tabakblätter und bespucken mit dem nikotinhaltigen Saft ausgerechnet die räuberische Großaugenwanze, die ihrerseits erst durch Duftstoffe, die von den verletzten Tabakblättern verströmt werden, auf die nahrhaften Raupen aufmerksam gemacht wurde. Nicht nur das: Wie Anne-Kathrin Schmidt (18) und Danny Kupka (18) aus Kölleda (Thüringen) näher erforschten, mischt die Raupe dem giftigen Priem auch noch eine Art Spülmittel bei, das den Wanzenpanzer erweicht und dadurch das Nikotin erst eindringen lässt.

Eistanz in Öl

Eis hat eine geringere Dichte als Wasser; Rizinusöl auch. Was passiert, wenn man einen Eiswürfel in Rizinusöl genau derselben Dichte wirft? Markus Helmer (20) aus Giengen und Matthias Müller (20) aus Bad Saulgau (Baden-Württemberg) haben für ihre Arbeit zu dieser Frage einen 3. Preis im Fachgebiet Physik erhalten.

Der Eiswürfel, der zunächst im Öl schwebt, schmilzt allmählich von außen ab (das Öl hat Zimmertemperatur). Dabei legt das Ensemble aus Wasser und Eis an Dichte zu und sinkt dadurch ab, bis der unter dem Eiswürfel hängende, allmählich anwachsende Wassertropfen sich ablöst und zu Boden sinkt. Der Rest-Eiswürfel hat wieder die Dichte des Öls und bleibt stehen, es sei denn, er wäre inhomogen: Trübes Eis enthält Luftbläschen und hat deswegen eine geringere Dichte als klares Eis. Wenn während des Abschmelzens eine der Eissorten das Übergewicht bekommt, bewegt sich der Würfel in die entsprechende Richtung. Ein chaotisches Verhalten mit manchen Überraschungen.



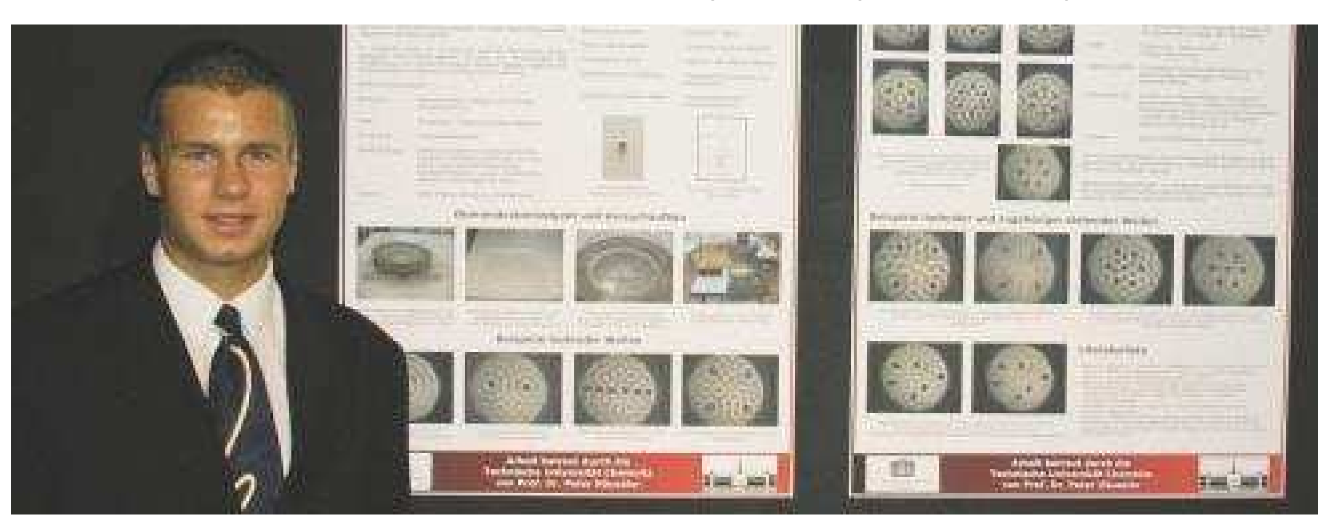



Der 1. Preis in Physik wurde für ein technisches Kunststück besonderer Art vergeben: Matthias Dübgen (19), Peter Jaschke (18) und Andreas Raba (19) aus der Umgebung von Gersthofen (Bayern) gelang es, einen Magneten über einen langen Kühlfinger auf –195 Grad Celsius zu kühlen, sodass er supraleitend wurde. Das Kühlmittel ist flüssiger Stickstoff. Ein Teil davon verdampft in einem Druckgefäß, und der Druck des gasförmigen Stickstoffs bringt das noch flüssige Kühlmittel auf den Weg, eine Lösung, die weit kostengünstiger ist als konventionelle Systeme.

Der große apparative Aufwand dient einem spielerischen Zweck: Der supraleitende Magnet hält über sich die Achse einer Lichtmühle in der Schwebe. Munter drehen sich die Flügel, getrieben von der Energie des Sonnenlichtes, die man unter großem Energieaufwand von der Lagerschale fernhält. Aber das muss nicht die einzige Nutzanwendung dieser Kühltechnik sein.

Jewgeni Strekalowski (21) aus Weimar hatte für seine Arbeit einen ganz biederen schulgeometrischen Anknüp- ▷

Roman Böttger (18) mit Welleninterferenzbildern aus seinem selbst gebauten Gerät





fungspunkt: die Höhen im Dreieck. Das sind die Senkrechten von einem Eckpunkt auf die gegenüberliegende Seite, und man pflegt in der Schule zu lernen, dass sie sich alle drei stets in einem Punkt schneiden. Eine neuer Blick auf das alte Thema lieferte eine Überraschung: Die Fußpunkte der Höhen bilden wieder ein neues, kleineres Dreieck. In diesem kann man wieder die Höhen einzeichnen, deren Fußpunkte zu einem neuen Dreieck verbinden und so weiter. Das ergibt eine Iterationsvorschrift.

Wie bei den klassischen Beispielen vom deterministischen Chaos ist die Folge der Winkel, die durch diese Vorschrift entstehen, zwar im Prinzip aus den Winkeln des Ursprungsdreiecks errechenbar; aber beliebig kleine Änderungen der Anfangswerte lassen die Folge völlig anders verlaufen. Jewgeni Strekalowski fand bei seinen Untersuchungen, die er auch auf andere Iterationsvorschriften ausdehnte, eines der »mathematischen Monster«, die in der Chaostheorie lauern: eine stetige, nirgends differenzierbare Funktion, samt expliziter formelmäßiger Darstellung. Seine Arbeit wurde mit dem 1. Preis in der Kategorie Mathematik/Informatik ausgezeichnet.

Denken in langen Zeiträumen gilt als wichtige ökologische Tugend. Den Rekord in dieser Hinsicht haben Norman Loeckel (20), Falk Töppel (20) und Johannes Knebel (19) aus Rostock und Umgebung aufgestellt. Leider ist ihre Arbeit aus ebendiesem Grund nur theoretischer Natur: Wie macht man die Venus für Menschen bewohnbar?

Unser innerer Nachbarplanet ist zwar der Größe nach der Erde vergleichbar und hat daher im Gegensatz zum Mars keine Schwierigkeiten, seine Gashülle bei sich zu behalten. Aber die besteht fast ausschließlich aus Kohlendioxid, was durch den Treibhauseffekt eine Oberflächentemperatur von mehreren hundert Grad erzeugt. Das im Verein mit einer geschlossenen Wolkendecke aus konzentrierter Schwefelsäure macht die Venus nicht gerade zum attraktiven Reiseziel.

Leben auf der Venus

Die Lösung des Problems besteht in der Entsendung von Bakterien, die sich unter diesen Bedingungen noch durchaus wohl fühlen. Auf der Erde gedeihen sie prächtig in den »heißen Schloten« am Meeresgrund, in denen die ätzendsten Stoffe aus dem Erdinneren hervorquellen. Nur kommt es entscheidend auf die Reihenfolge an. Auf keinen Fall darf man zuerst die Schwefelsäurewolken abbauen, denn die reflektieren einen großen Teil des Sonnenlichts in den Weltraum zurück und verhindern so, dass es noch heißer wird. Aber die Bakterien, die zu gegebener Zeit Schwefelsäure in Massen konsumieren sollen, gibt es auch schon.

Auf die Laufzeit des Projekts umgelegt liegen die Kosten bei wenigen Millionen Euro pro Jahr und damit im Peanutsbereich für eine Organisation wie die Nasa. Nur beträgt die Laufzeit halt zehn Millionen Jahre.

Immerhin: Die abgefahrene Idee und ihre Durchführung waren dem DLR einen Sonderpreis von 750 Euro wert.

Weitere herausragende Arbeiten dieses Bundeswettbewerbs sollen in der nächsten Folge von »Junge Wissenschaft« gewürdigt werden.

Jewgeni Strekalowski (21) fand Chaos in einer Folge aus der elementaren euklidischen Geometrie.



Jugend forscht

Im Jahre 1965 von Henri Nannen, dem damaligen Herausgeber des »Stern«, gegründet, ist »Jugend forscht« zur klassischen Nachwuchsförderung für Jugendliche avanciert, die sich ihr Forschungsthema selbst aussuchen und viel Arbeit zu investieren bereit sind. Die Ausschreibung wendet sich an die Altersgruppe von 16 (neuerdings 15) bis 21 Jahren; für die Jüngeren gibt es den gleichartig aufgebauten Wettbewerb »Schüler experimentieren«. Für die Finanzierung teurer Experimente steht ein Sponsorenpool zur Verfügung.

Der Wettbewerb wird in den Fachgebieten Arbeitswelt, Biologie, Chemie, Geo- und Raumwissenschaften, Mathematik/Informatik, Physik und Technik ausgetragen. Die Jungforscher treten zunächst in Regionalwettbewerben gegeneinander an (nicht in Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein und im Saarland); die Sieger treffen sich in Landeswettbewerben und deren Sieger wiederum im Bundeswettbewerb.

Die Arbeit der Geschäftsstelle von »Jugend forscht« wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanziert. Seit den Anfangszeiten ist die Industrie maßgeblich beteiligt: Die Regionalwettbewerbe werden regelmäßig von einem örtlichen Industrieunternehmen ausgerichtet, und neben den offiziellen Preisen gibt es zahlreiche von der Industrie gestiftete Sonderpreise. Auch der Bundeskanzler vergibt alljährlich einen Sonderpreis für die originellste Arbeit.

Zur 40. Wettbewerbsrunde 2005 haben sich mehr als 8900 Teilnehmer angemeldet. Der Mädchenanteil ist inzwischen auf fast 40 Prozent angestiegen.

Stiftung Jugend forscht e. V.
Baumwall 5
20459 Hamburg
Telefon 040 374709-0
Fax 040 374709-99
www.jugend-forscht.de
E-Mail: info@jugend-forscht.de



AUTOR

Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Die zehn Geschlechter von Amarete



ALLE FOTOS: INA RÖSING

Männlich? Weiblich? Ein Dorf in den Anden kennt weitaus mehr Differenzierungen.

Links ist die weibliche, rechts die männliche Seite eines Hauses oder umschlossenen Platzes. Daran, wohin sich die Männer des Dorfrats setzen, erkennt der Außenstehende leicht ihr symbolisches Geschlecht.

Von Ina Rösing

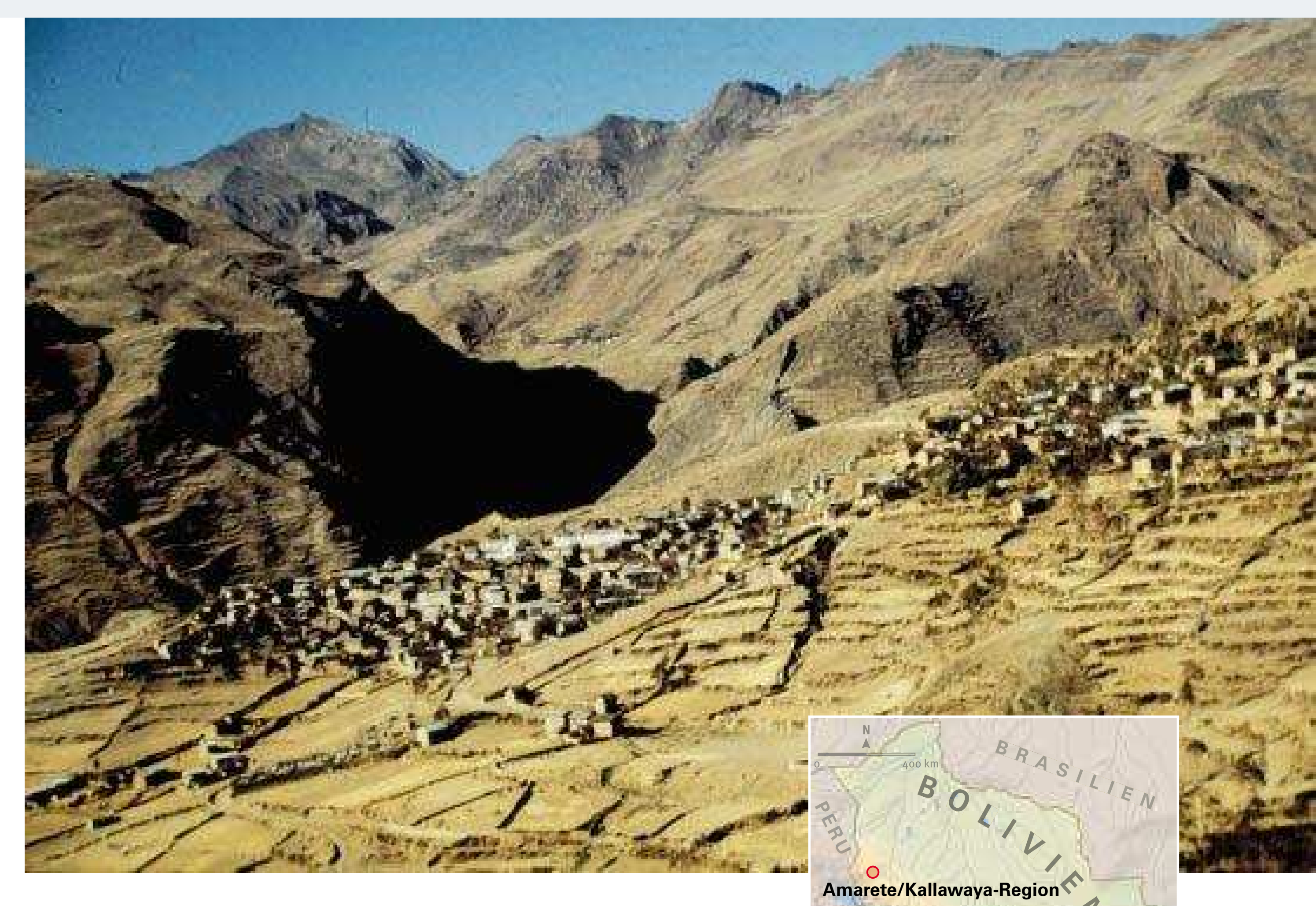
Welcher Tag ist heute? Ein weiblicher oder ein männlicher? Ist diese Seite des Hauses männlich oder ist sie weiblich? In Amarete, einem 4000 Meter hoch gelegenen Dorf der Kallawaya-Region in den bolivianischen Anden, wüsste jedes Kind sofort eine Antwort auf diese uns befremdlich erscheinenden Fragen zu geben. Dort ist die Tradition der Kollektivrituale noch lebendiger als irgendwo sonst in dieser Region. Und in Amarete tragen Zeit und Raum, Richtung und Farbe, Ackerland und Ämter ein Geschlecht. Die Einwohner haben sogar gleich mehrere.

Als ich 1984 zum ersten Mal in die Kallawaya-Region kam und meine Forschung bald auf Amarete konzentrierte, kannte ich freilich nur die Einteilung nach der Biologie: Mann und Frau, sonst nichts. Doch eine Reihe unscheinbarer Erlebnisse zeigte mir, dass es in Amarete viel komplizierter ist. Zum Beispiel die Sache mit der Tarantel.

Mehr als vierzig Menschen drängten sich in einer kleinen fensterlosen Hütte aus Lehm und Stroh bei schwachem Kerzenlicht zu einem der großen Kollektivrituale des Jahres. Mutter Erde und die Berggottheiten sollten Opfer erhalten, um die Fruchtbarkeit der Äcker zu sichern. Ich saß im Kreis der Frauen nahe der Wand.

Plötzlich entdecke ich im Halbdunkel nahe meiner Schulter eine Tarantel. Ihr Biss kann tödlich sein. Ich rühre mich nicht, achte nur darauf, der Wand nicht näher zu kommen. Doch nun betritt eine Nachzüglerin die Hütte, Maria, grüßt, windet sich durch die Menge, quetscht sich zwischen zwei Frauen – und drängt mich damit Richtung Tarantel. *Caramba, Maria, mana waqpitaq tiyarikuwaqchu*, flüstere ich ihr in Quechua zu. (Kannst du nicht woanders sitzen, verdammt.) Nein, sie tut es nicht. Nun, ich habe es überlebt. Aber ich habe – wie es sich für eine Kulturanthropologin gehört – die Szene in meinem Gedächtnis gespeichert.

Während eines anderen, drei Tage und drei Nächte dauernden Kollektivrituals mit seinen komplizierten Abläufen kommt der Präsident des Dorfrats auf mich zu und sagt: »Meine Schwester, hast du gesehen, wie ich getanzt habe?« Das Eigenartige daran war seine Wortwahl:



Das Indianerdorf Amarete in den bolivianischen Anden gehört zur Kallawaya-Region – einem Gebiet, in dem die Tradition der Kollektivrituale noch lebendig ist. Der Ort besteht aus Ober-, Unter- und Mitteldorf, umgeben von terrassenförmig angelegten Äckern.

Das Quechua-Wort für die Schwester eines Mannes ist *pana*, das Wort für die Schwester einer Frau *ñaña*. Und dieses Wort hatte er verwendet, so als wäre er eine Frau.

Und dann war da die Sitzung des Dorfrats. Etwa zwanzig Männer hatten sich in einer Hütte versammelt, als Juan hereinkam. Er war noch jung und hatte zum ersten Mal ein Amt im Rat inne. Juan steuert auf die freien Bänke auf der linken Seite zu, da spottet einer von der gegenüberliegenden Seite: *»Juan, ama yankalla naykita jina wijch'uychu.«* Zu Deutsch: »Juan, ich würde doch meinen Schwanz nicht freiwillig wegwerfen – setz dich hierher«, und die Männer lachen und verweisen nach rechts.

Herr Sonne und Frau Abend

Es sollte einige Jahre dauern, bis ich diese und andere Beobachtungen verstand. Papier und Bleistift, ein Minidiktiergerät und ein Tonbandgerät sowie ein Fotoapparat waren meine Hilfsmittel bei der »teilnehmenden Beobachtung«, der bevorzugten wissenschaftlichen Methode des Ethnologen. Dass mir überhaupt der Zugang zu Dutzenden von Kollektiv- und Heilungsritualen gewährt wurde, war alles andere als selbstverständlich. Doch sobald sich herumgesprochen hatte, welch hohe Achtung ich den Menschen Amaretes und ihrer Religion, in der sich ursprünglich Andines mit Christentum mischt, entgegenbringe, standen mir die Türen offen.

Was ich zunächst herausfand, war, dass die Menschen in Amarete außer einem biologischen auch ein symbolisches Geschlecht haben: Männer können symbolisch Mann oder Weib sein, Gleiches gilt für Frauen. Und jeder Amareteñer, selbst ein sechsjähriges Kind, weiß dieses Geschlecht zu benennen. Aber an Merkmalen, Kleidung oder Insignien kann man es nicht erkennen. Es gibt nur einen sichtbaren Hinweis: Symbolisch männliche Menschen sitzen rechts, symbolisch weibliche links.

Geschlechtliche Zuweisungen zu Phänomenen der Lebenswelt sind in den Anden weit verbreitet. Der Vormittag, also die Zeit der aufsteigenden Sonne, ist männlich, Nachmittag und Abend sind weiblich; nur die Nacht ist geschlechtslos. In der Dimension des Raums gilt oben meist als männlich und unten als weiblich, rechts ist immer männlich, links stets weiblich. Auch Richtungen, Farbe, Material und Beschaffenheit haben ein Geschlecht, ebenso sakrale Phänomene. Als wichtigste Gottheit verehrt man die allgegenwärtige – und natürlich weibliche – Mutter Erde. Auf der Erde aber gibt es auch männliche Räume, zum Beispiel die Berge, Wohnort von ▷

▷ Gottheiten. Berge können sogar ein doppeltes Geschlecht haben, je nach Zuständigkeit der Berggottheit. Zum Beispiel ist der Tuwana-Gipfel als Berg männlich, seine Gottheit aber ist für *tawicho* zuständig, für Nahrung. Die ist weiblich, also ist der Tuwana auch ein Weib.

Dies alles wissend hätte ich gewarnt sein sollen, als ich Juana kennen lernte. Sie war auch symbolisch weiblich und saß im Kreis der Frauen dementsprechend links. Meine Erkenntniswelt war in Ordnung. Ein halbes Jahr später aber hockte sie rechts – im männlichen Raum. »Warum sitzt du rechts, Juana?«, frage ich überrascht. »Weil ich männlich bin«, erklärte sie ganz selbstverständlich. »Wieso bist du plötzlich männlich?«, frage ich, nun an mir selbst zweifelnd. Ihre Antwort: *»Jina puni kaq kasqa mundoq paqarisqanmantapacha.«*

Als Feldforscherin hörte ich diesen Satz unzählige Male in Amarete, sobald ich eine Warum-Frage stellte. Er bedeutet: »Das ist schon immer so gewesen, seit Geburt der Welt.«

Geschlechterwechsel bei der Heirat

Was war geschehen? Ich wusste, Juana hatte geheiratet. War das der Grund? Auf einem Fest traf ich auch Mara, die mir als symbolisch männlich bekannt war. Jetzt aber saß sie auf der linken Seite, der weiblichen. Ich fragte sie, ob sie geheiratet habe. »Ja.«

Wechseln Frauen also durch die Ehe ihr symbolisches Geschlecht? Ich ging der Frage nach und fand die entmutigende Antwort: manchmal ja, manchmal nein. Nur eines fand ich definitiv: Männer bleiben, was sie sind. Warum? *Jina puni kaq kasqa mundoq paqarisqanmantapacha.*

Mir kam ein anderer Gedanke: Darf ein symbolisch weiblicher Amareteñer vielleicht nur eine symbolisch männliche Frau ehelichen beziehungsweise umgekehrt? Müssen die Partner also symbolisch verschiedengeschlechtlich sein?

Das Ergebnis nach vielem Fragen und Beobachten: Nein, im Gegenteil, die symbolischen Geschlechter müssen übereinstimmen. Und deshalb wechseln manche Frauen ihr symbolisches Geschlecht – sie gleichen es dem des Gatten an. Damit kannte ich einen winzigen Baustein von dem, was schon immer so gewesen ist, seit Geburt der Welt.

Ich fragte mich, ob dies nur für eheliche Beziehungen oder für jede Liebesbeziehung gilt. Dieses Mal hörte ich mich um, und was die Gerüchteküche hergab, machte deutlich: In Amarete schlafen außerehelich und vorehelich symbolische Männer und Frauen »durcheinander miteinander«. Mit der freien Paarung hat das symbolische Geschlecht also nichts zu tun.

Soweit war also alles klar: Nur Frauen können ihr symbolisches Geschlecht ändern und auch das nur bei der Heirat. Dann lernte ich Ubaldo kennen. Er saß immer rechts, weil er symbolisch Mann war. Doch eines Tages komme ich in seine Hütte zu einem wichtigen Ritual und Ubaldo sitzt – links.



▲ **Der Ernteertrag sichert das Überleben der Dorfgemeinschaft, dementsprechend versuchen die so genannten Ritualisten in mehrtägigen Opferfeiern die Gottheiten günstig zu stimmen. Wird dabei die Erde rituell zum ersten Mal umgegraben und die erste Saat eingelegt, offenbart sich die Geschlechtszuordnung zu den Ämtern. Der Präsident des Dorfrats (weibliches Amt) geht – wie es einer Frau zukommt – gebeugt hinter dem Justizsekretär (männliches Amt), wendet die Scholle mit bloßer Hand und zerkleinert sie mit einem Stock.**

Ich fragte: »Ubaldo, warum sitzt du links? Links ist doch weiblich.«

Ubaldo: »Ich sitze links, weil ich weiblich bin. Ich bin jetzt *kuraq mallku*, Chef des Dorfrats.«

Ich: »Aber was hat das mit weiblich zu tun?«

Er: *»Jina puni kaq kasqa mundoq paqarisqanmantapacha.«*

Auch das Amt des obligatorischen Gehilfen des *kuraq mallku* hat ein Geschlecht, weiblich wie das seines Chefs. Warum nur? *Jina puni kaq kasqa mundoq paqarisqanmantapacha.* Ich konnte es nicht mehr hören!

Niemand in Amarete vermag abstrakt und außerhalb von Handlungsabläufen zu erklären, was es mit dem symbolischen Geschlecht auf sich hat. Doch alle wissen genau Bescheid. Es ist implizites Wissen und wird in der Praxis aktiviert. Das Gleiche gilt für unsere Muttersprache: Wir sprechen grammatikalisch korrekt, aber von der Mehrheit der deutsch Sprechenden wird man die abstrakten Regeln nicht einfach abrufen können.

IN KÜRZE

▶ Die Kallawaya-Region ist ein Teil der Provinz Bautista Saavedra des Departments La Paz in Bolivien. Sie ist benannt nach den **Kallawaya-Medizinmännern** dieser Gegend. Diese heilen mit Kräutern und Ritualen und bereisen als ambulante Heiler Bolivien und Teile von Peru.

▶ In der Religion der Anden vollzieht ein so genannter Ritualist die **Opfergabenrituale** für die Mutter Erde, die heiligen Berge, den Blitz, die Ahnen und den Wind Ankari. Von diesen allen hängt es ab, ob Mensch, Vieh und Acker gedeihen.

▶ **Kollektivrituale** sind Opferzeremonien für das Wohl der ganzen Dorfgemeinschaft, während **Heilungsrituale** im Kontext der Familie stattfinden.

Ich musste also die verborgene »Geschlechtsgrammatik« von Amarete auf anderem Weg herausfinden. Ich beobachtete und dokumentierte jede noch so unscheinbare Begebenheit. Da gab es zum Beispiel immer wieder einmal ein kurzes Gerangel um die Reihenfolge der Sitzplätze innerhalb der linken oder rechten Seite. Offenbar waren mir noch Regeln verborgen. Es war auch nicht zu übersehen, dass nur ganz bestimmte Männer mit ganz bestimmten anderen Männern tanzen durften – aber wer mit wem? Das symbolische Geschlecht, soweit ich es verstanden hatte, reichte als Erklärung nicht aus.

Welche Erleuchtung, als ich herausfand, dass es in Amarete neben dem »manifesten«, etwa in der Sitzordnung sichtbaren, symbolischen Geschlecht noch ein »verstecktes« gibt. Das kennen zwar auch alle, doch nur wenige können damit in komplizierteren sozialen Kontexten umgehen. Die meisten Dorfbewohner tragen tatsächlich ein symbolisches Doppelgeschlecht.

Älterer Acker ist weiblich

Dieses Phänomen offenbarte sich mit der Zeit als unendlich komplexes System, das alle Lebensbereiche der Amareteñer umspannt, vom Alltag über die Ämter im Dorfrat bis hin zu Religion und Ritual. Eine zentrale Frage bei der Erkundung dieser Kosmologie war: Welches Geschlecht haben die Felder? An erster Stelle sind sie natürlich Teil der *Pachamama*, der Mutter Erde, also weiblich. Darüber hinaus aber tragen sie noch ein zweites und gar drittes Geschlecht: Jeder, auch der kleinste Acker hat zwei Kennzeichnungen. Er ist »oben« oder »unten« und er ist »älter« oder »jünger«. Oben-Äcker liegen aber nicht unbedingt oben am Berg, die Unten-Äcker keinesfalls zwangsläufig im Tal. Dieses Attribut ist auf der topografischen Karte vielmehr willkürlich verteilt, hat also ganz offensichtlich keinen realen, sondern einen symbolischen Bezug. Gleiches gilt – natürlich – auch für die Jünger-älter-Einteilung: Dieses Attribut hat mit dem tatsächlichen Alter des Ackers, etwa der Zeit seit seiner Rodung, nichts zu tun.

Bedeutsam aber ist das Geschlecht dieser Ackerkennzeichnungen: Älter ist weiblich, jünger ist männlich, oben ist (allerdings nur im Fall der Äcker) weiblich, unten männlich. Auf diese Weise ergeben sich vier doppelgeschlechtliche Ackersorten. Außerdem existiert eine Sorte Ackerland – eine Minderheit allerdings –, die schlicht und langweilig einfach nur männlich ist. Insgesamt kennen die Amareteñer also fünf Sorten von Ackergeschlecht. Der springende Punkt ist nun, dass dieses Geschlecht des Ackers das seines Besitzers bestimmt.

Angenommen, mir gehört älteres Unten-Land, dann bin ich zwar biologisch Frau, symbolisch aber ein Doppel-Mann. Bei zwei biologischen und fünf Ackergeschlechtern ergeben sich also für die Bewohner von Amarete insgesamt zehn Geschlechter (siehe Tabelle S. 74). Diese Angelegenheit verkompliziert sich ein wenig – unwesentlich – dadurch, dass dort nicht nur Zeit, Raum, Richtung, Landschaft, Äcker, Menschen, sondern auch öffentliche Ämter ein Geschlecht haben.

Jedes Jahr werden für die Dorfvertretung achtzehn Posten vergeben. Die vier höchsten und die zwei niedrigsten tragen – ein Geschlecht. Da man aber sogar in Amarete nicht mehr als drei davon haben kann, legt man bei der Übernahme eines geschlechtlichen Amts für die Dauer der Amtsausübung sein Ackergeschlecht ab. Natürlich gilt: Die Frau übernimmt dann das Amtsgeschlecht ihres Mannes. So ist etwa der wichtigste Posten, der Präsident des Dorfrats, weiblich, ebenso das Amt seines Gehilfen. Und das muss man dann in Sitzordnung, Verhalten, Anredeform, Handlungsfolgen, Tanzordnungen und vielem mehr sorgfältig beachten.

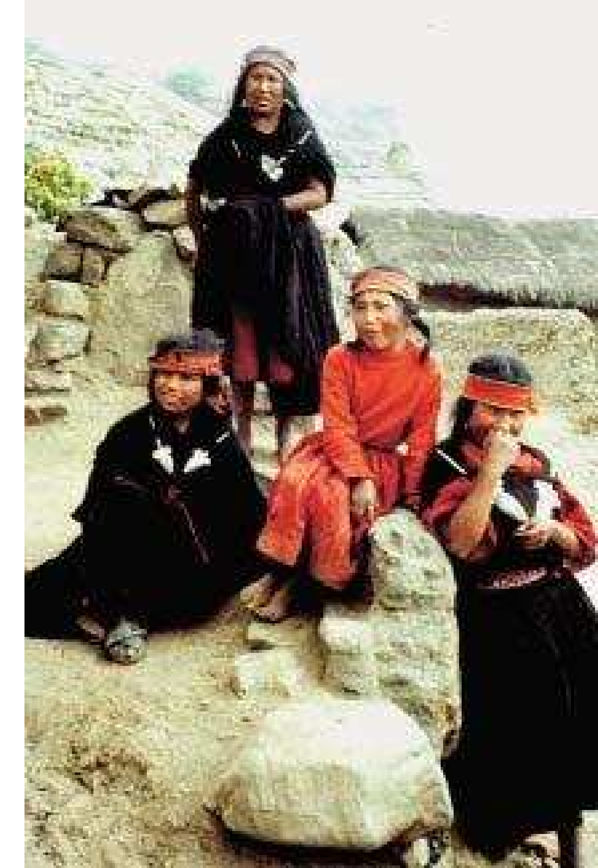
Wie real dieses System der zehn Geschlechter ist, zeigt sich auch an den Strafen, die fällig sind, wenn jemand die Regeln nicht einhält. Eine davon heißt *kunka q'ewiy*. Das bedeutet »Halsumdrehen« und ist im übertragenen Sinn gemeint: eine harte physische Strafe. Eine andere ist die öffentliche Rüge oder die öffentliche Verspottung.

Ob man symbolisch Mann oder Frau ist, bestimmt den sozialen Status, die Freiheiten, die Pflichten und Arbeiten, die Paarung und im Kollektivritual alle Bewegungen, Ereignisse und Handlungen. So hat sich ein weiblicher Mann – mit Ausnahme des weiblichen Präsidenten – hinter einem männlichen einzuordnen. Er sitzt, wie erwähnt, auch auf der »schlechteren« Seite der Hütte: links. (Die linke Seite des Leibs gilt normalerweise weniger als die rechte.) So verhält es sich auch mit der symbolischen Geschlechtlichkeit der Frau: Männliche Frauen sitzen rechts, weibliche links.

Männliche Ämter bevorzugt

Nun wird das eingangs geschilderte Erlebnis mit Maria und der Tarantel verständlich: Sie musste als Frau des Justizsekretärs – männliches Amt – unweigerlich direkt rechts neben der Hauptritualfrau sitzen. Jeder andere Platz hätte ihr sofort Sanktionen eingebracht.

Dass weibliche Männer tatsächlich den niedrigeren Status der Frau erfahren, zeigte der Spott, als sich der vom Ackergeschlecht her männliche Juan im Dorfrat auf der linken Seite der Hütte niederlassen wollte. Kein Wunder also, dass »weibliche« Amarete-Männer männliche Ämter bevorzugen. Manchem bleibt dieses Glück verwehrt, so auch Francisco Limachi, der mich in meinen Eingangsbeispielen als »Schwester einer Frau« angesprochen hatte. Er gehörte vom Acker her der weiblichen Seite an. Zunächst wurde er zum Gehilfen des Präsidenten ▷



Eine Frau und drei Mädchen? Das wäre doch eine stark vereinfachte Betrachtungsweise. Tatsächlich ist diese Erwachsene eine mann-weibliche Frau, die abgebildeten Mädchen sind von links nach rechts: mann-männlich, weib-männlich und weib-weiblich.

gewählt – ein weibliches Amt. Nun, als Präsident, ist Francisco Limachi verantwortlich für die großen Kollektivrituale, die vor allem durch Opfer an die Götter Nahrung sichern sollen. Nahrung *(tawichu)* ist wie erwähnt weiblich. Wohl deshalb ist, so sagen die Amareteñer, das Amt des Präsidenten weiblich.

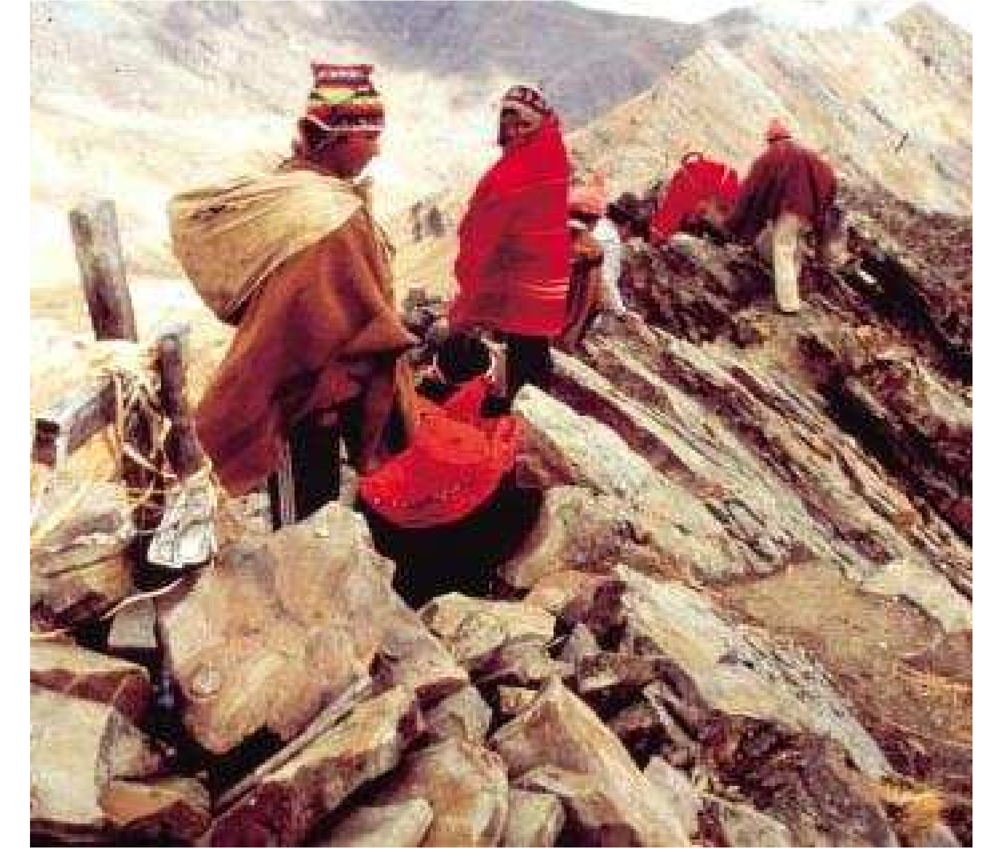
Wie konkret sich die Amtsgeschlechtlichkeit auswirkt, zeigt folgendes Beispiel: In Amarete dürfen sich die Männer bei großen Ritualen bis zur Bewusstlosigkeit betrinken. Die Frauen nicht, denn sie müssen ihre Gatten anschließend noch irgendwie nach Hause schaffen. Während eines wichtigen Agrikulturrituals werden die zwei symbolisch männlichen Amtsträger des Dorfrats in eine Hütte gesperrt und betrunken gemacht. Wer muss sie dann rausholen und versorgen? Nun, der weibliche Präsident und der weibliche Finanzsekretär.

Vor diesem Hintergrund verstand ich nun, dass mich Francisco mit seiner langen Erfahrung an symbolischer Weiblichkeit mit *ñaña*, ansprach, als Schwester einer Frau. Damals wollte er wissen, wie mir sein Tanzen gefallen habe. Männer bewegen sich dabei diszipliniert bis verklemmt, machen kleine Schritte und Bewegungen. Wie aber hatte Francisco getanzt? Wie eine Frau: die Arme ausgebreitet, den Kopf zurückgelegt. Er hatte es ungemein genossen! Einen Augenblick lang profitierte er von den wenigen positiven Seiten des Frauseins in Amarete.

Übrigens tanzt man in Amarete paarweise, aber nicht nach den biologischen, sondern nach den symbolischen Geschlechtern. Der Präsident (weiblich) tanzt mit dem Justizsekretär (männlich), und auch beider Frauen bilden ein Paar.

symbolisches Geschlecht	biologisches Geschlecht ♂	biologisches Geschlecht ♀
	♂	♂
	♂♂	♂♂
	♀♀	♀♀
	♂♀	♂♀
	♀♂	♀♂

Aus dem biologischen sowie den zwei symbolischen Geschlechtern der Einwohner Amaretes ergeben sich insgesamt zehn verschiedene Kombinationsmöglichkeiten.



Äußerst filigran wird die Geschlechtskombinatorik im rituellen Bereich. Dies zu verstehen hat mich viele eiskalte Nächte, schwierige Aufstiege auf bis zu 4500 Meter hohe Gipfel und unzählige lange Sitzungen mit den Ritualisten und den Medizinmännern gekostet. Ich gebe nur ein Beispiel, bei dem ich Sonder- und Nebenregeln sowie durch Traditionsverlust bedingtes Chaos auslasse.

Symbolische Paarbildung bei Kollektivritualen

Ein mehrtägiges Opferritual, das vom Dorfrat zusammen mit den Ritualisten zelebriert wird, benötigt viele Opfergaben. Welcher Dorfrat was beiträgt, ist keinesfalls beliebig. Amts- und Ackergeschlecht der Spender müssen auf das Geschlecht der Opfergaben und der Opferstätten derart abgestimmt werden, dass sich eine vielfache Verheiratung ergibt – wie es die Amareteñer selbst nennen.

Eine erste Regel ist, dass das symbolische Geschlecht des Spenders mit dem biologischen der Opfergabe übereinstimmen muss. Wer nach Amt oder Ackergeschlecht weiblich ist, darf zum Beispiel nur ein weibliches Meerschweinchen darbringen. Zweitens müssen die Opferspender symbolische Paare bilden. Also stiftet der symbolisch weibliche Präsident des Dorfrats einen weiblichen Lamafötus und der männliche Justizsekretär einen männlichen. Mit den nach der gleichen Regel erfolgenden Darbringungen des symbolisch männlichen Sozialsekretärs und des weiblichen Finanzsekretärs ergibt sich eine weitere Paarbildung beziehungsweise Verheiratung.

Nun die dritte Regel: Auch die Opferorte müssen ein Paar bilden. Zum Beispiel sind der heilige Berg Atichamán und die Opferstätte auf seinem Gipfel männlich. Im Tal gibt es eine weibliche Opferstätte, genannt *Q'owa Esqani*. Hat der Präsident einen weiblichen Lamafötus dem männlichen Atichamán dargebracht, so muss das von ihm gestiftete weibliche Meerschweinchen der Opferstätte des weiblichen *Q'owa Esqani* zugeordnet werden (so bilden die »Beopferten« ein Paar). Alle seine Opfergaben, die das gleiche Geschlecht haben wie er, werden also an verschiedengeschlechtlichen Opferorten mit verschiedengeschlechtlichen Opfergaben andersgeschlechtlicher Amtsbrüder (oder Ackergeschlechter) verheiratet.

Nachdem ich das System der zehn Geschlechter von Amarete begriffen hatte, wollte ich natürlich auch wissen, wie sich ein derart kompliziertes System entwickeln konnte. Eines Tages begleitete ich den Indianer Paulino zum Friedhof. Er sagte, das Grab seiner Frau liege rechts. Wo ist denn rechts, fragte ich. Er wedelte mit der linken Hand: »Na, dort natürlich.«

»Warum, Paulino? Hier ist deine rechte Hand und du sagst, rechts sei da, links?«



Bei rituellen Tänzen bestimmt das Ämtergeschlecht die Paarbildung (rechtes Bild). Hier tanzt der weibliche Präsident des Dorfrats Francisco Limachi (in der Mitte) mit einem männlichen Amtsträger. Seine geöffneten Arme entsprechen dem weiblichen Tanzstil. Die Geschlechterordnung bestimmt auch die Teilnahme an Opferdarbringungen auf den Berggipfeln (linkes Bild). Dort oben wohnen einige der Götter, von deren Wohlwollen der Ernteertrag abhängt.

Man kennt seine Antwort auf mein Warum.

Schließlich verstand ich. In der freien Natur gilt: Wo die Sonne aufgeht, ist männlicher, wo sie untergeht, weiblicher Raum. Deshalb ist der Vormittag männlich, Nachmittag und Abend aber sind weiblich. Und so wird auch verständlich, warum die Nacht für die Dorfbewohner kein Geschlecht hat.

Ich versuchte nun, die Oben- und Unten-Äcker zum Auf- und Untergang der Sonne in Beziehung zu setzen. Fehlanzeige. Dann gab mir ein Indianer, den ich in stockdunkler Nacht nach dem Weg ins Oberdorf von Amarete fragte, die Antwort: »Geh in Richtung Untergang der Sonne!« Das war die Fährte! Das Oberdorf liegt auf der Seite des Sonnenuntergangs.

Die Äcker der Leute vom Oberdorf wurden ursprünglich alle als »oben« bezeichnet, die zu Bewohnern des Unterdorfs gehörenden galten als »unten«. Warum aber sind die Oben-Äcker nicht männlich, sondern weiblich? Ganz einfach, weil das Oberdorf auf der Seite des Sonnenuntergangs (weiblich) liegt.

Blieb noch eine Frage zu klären: Was hatte es mit dem »älter« und »jünger« eines Felds auf sich? Ich fand heraus, dass diese Zuweisung auf dem Steuersystem der spanischen Kolonialzeit beruht. Wie viel ein Bauer zu zahlen hatte, richtete sich nach der Güte seines Ackers. Mitunter war der Boden schlecht oder der Hang steil. Schlechtere Äcker werden »jünger« genannt im Sinne von »weniger«. In anderen Fällen steigert eine nahe Quelle den Ertrag des Ackers. Ein solcher Acker ist »mehr«, ist »älter«. Wo immer »älter« oder »jünger« als Attribut verwendet wird, bezeichnet »älter« das Bessere, Höhergestellte. Und das ist in Amarete immer männlich.

Eine Frage des Überlebens

Damit war die Übersetzungsarbeit beendet. Ein weib-männlicher Mann ist ein Mann aus dem Oberdorf, der etwas besseres Ackerland hat. Und ein weib-weiblicher Mann? Das ist ein Oberdörfler mit schlechteren Äckern. (Und die nur männlichen Äcker sind die allerbesten!)

Zum Abschluss die Frage: Wie soll man dieses System der Zehnfachgeschlechtlichkeit bewerten? Wozu so viele kalte Nächte der Forschung, warum diese Flohplage, die man dort ertragen muss, und das alles finanziert von namhaften Institutionen der Forschungsförderung? Wissen wir nicht längst, dass Menschen sich die merkwürdigsten Dinge ausdenken: fliegende Schamanen, eine unbefleckte Empfängnis, das Internet oder eben ein System aus zehn Geschlechtern?

Irgendetwas muss aber daran sein, denn sonst hätte die Unesco die Kallawaya-Kultur, zu der Amarete gehört, kaum vor zwei Jahren zum Weltkulturerbe erklärt (genauer zum *Masterpiece of the Oral and Intangible Heritage of Humanity*). In der Tat ist das Geschlechtersystem eine Kosmologie, das heißt ein geordnetes System, in welchem das Ganze und seine Teile, der Alltag und der sakrale Bereich aufeinander bezogen sind.

Das Leben ist hart für die etwa 1500 Einwohner Amaretes, die von Ackerbau und Viehzucht leben. Nachts kann es bis zu minus zehn Grad Celsius kalt werden. Heizung, Elektrizität, fließendes Wasser, Abwasserkanäle – es gibt nichts davon. Die durchschnittliche Lebenserwartung liegt bei etwa fünfzig Jahren. Doch das ist nicht die ganze Wirklichkeit. Auch die Kosmologie ist eine gelebte Realität: In Amarete ist alles miteinander verwoben, Alltag und Ritual, Ackerarbeit und Geselligkeit, Ämter und Götter, die Hierarchie der Lebenden und der Toten, die Wirkung der Götter und der schwarzen Wesen. Und diese Vernetzung von allem mit allem ist der Inbegriff einer Kosmologie. Ihr Bauprinzip ist im Fall von Amarete das System der zehn Geschlechter, das Himmel und Erde zusammenbringt. »Und das war schon immer so, seit Geburt der Welt.« ◁


AUTORIN UND LITERATURHINWEIS



Die Ethnologin **Ina Rösing** (hier beim Tanz mit Frauen von Amarete) leitet das Institut für Kulturanthropologie am Universitätsklinikum Ulm; sie ist Mitglied der Heidelberger Akademie der Wissenschaften. Für ihre Erforschung der Kallawaya-Kultur in den Anden Boliviens erhielt sie mehrere Forschungspreise.

Religion, Ritual und Alltag in den Anden. Die zehn Geschlechter von Amarete, Bolivien. Von Ina Rösing. Reimer Verlag, 2001

STEPHEN DAGADAKIS, UNIVERSITY OF WASHINGTON / HUNTER G. HOFFMAN



Therapie im Cyberspace

Eintauchen in virtuelle Welten hilft Patienten, Schmerzen oder Phobien zu bewältigen.

Schneemänner abschießen, Eismonster jagen – was nach einem Freizeitvergnügen für Computerfreaks aussieht, hat einen dramatischen Hintergrund. Mit Datenbrille und Joystick versucht sich dieses Brandopfer von den qualvollen Schmerzen abzulenken, die bei der Wundbehandlung unvermeidlich sind.



HUNTER G. HOFFMAN

Von Hunter G. Hoffman

Die Helden der Science-Fiction-Trilogie »Matrix« entdecken, dass ihre Welt nur eine Illusion ist, generiert von einem Supercomputer. Um ihn zu besiegen, lassen sich die Rebellen zwar auf die künstliche Welt ein, versuchen aber, deren Möglichkeiten zum eigenen Vorteil zu nutzen. Sofern unser Alltag hier und jetzt Wirklichkeit ist, feiert die virtuelle Realität (VR) darin durchaus ihre Siege: Architekten führen ihre Auftraggeber durch Gebäude, die nur als Bits und Bytes existieren, Automobildesigner prüfen ihre Ideen an virtuellen Fahrzeugen. Auch Ärzte und Psychologen wenden sich inzwischen der Scheinwelt zu, um gravierende Probleme zu behandeln.

Seit neun Jahren erforsche ich gemeinsam mit dem Hochschulkollegen und Schmerzexperten David R. Patterson, welche Chancen virtuelle Welten bieten, Brandopfern Erleichterung zu verschaffen. Welch furchtbare Pein schwere Verbrennungen verursachen, kann wohl niemand ermessen, der solche Patienten nicht erlebt hat. Selbst das lange Heilverfahren lässt sich trotz starker Opioide, dem Morphium verwandte Schmerzmittel, oft kaum aushalten. Ärzte und Pflegepersonal setzen den Betroffenen täglich von Neuem zu: Um Entzündungen vorzubeugen, reinigen sie die Wunde und entfernen totes Gewebe; damit die Haut elastisch bleibt und Muskeln nicht schwinden, dehnen die Betreuer den betroffenen Bereich.

Bei einer solchen Tortur wünschen sich die meisten Betroffenen – und ganz besonders Kinder –, dem wenigstens in Gedanken entfliehen zu können. Dabei zu helfen, daran arbeiten wir gemeinsam mit anderen Kollegen der Universität von Washington in Seattle: der Stab des Harborview Burn Center, Ärzte von der Medizinischen Fakultät und mein Team am Human-Interface-Technology-Laboratorium (HIT Lab).

Schmerz ist einerseits eine Sache der Physiologie: Rezeptoren registrieren die Berührung der wunden Gewebe und senden ein elektrisches Signal an weiterverarbeitende Stationen unseres Nervensystems. Verblüffend aber ist, wie sehr andererseits unsere seelische Verfassung und unser Denken das Schmerzempfinden beeinflussen. Die gleichen Reize können als mehr oder weniger schmerzhaft eingestuft werden. Psychologische Faktoren bestimmen sogar mit, wie viele Signale überhaupt zu jenen Instanzen unserer Großhirnrinde durchdringen, die mit der bewussten Wahrnehmung von Schmerz zu tun haben. Die Neurophysiologen Ronald Melzack und Patrick D. Wall entwickelten in den 1960er Jahren deshalb eine Theorie der »Einlass-Kontrolle« entsprechender Signale (Spektrum der Wissenschaft 8/1993, S. 84).

Schon seit Langem ist bekannt, dass beispielsweise Musik von körperlicher Qual ablenken kann. Virtuelle Realität (VR), so vermuteten wir, sollte ideal für diesen Zweck sein, zumal diese moderne Form der Zerstreuung der jungen Generation entgegenkäme. Wir prüften unsere These an zwei jungen Patienten. Beide hatten schwere Verletzungen durch verbrennendes Benzin erlitten. Beim ersten war ein Bein, beim zweiten sogar ein Drittel seines Körpers betroffen, einschließlich Gesicht und Hals. Das »Experiment« lief, als Klammern entfernt wurden, die transplantierte Haut fixiert hatten.



Küche mit Spinne

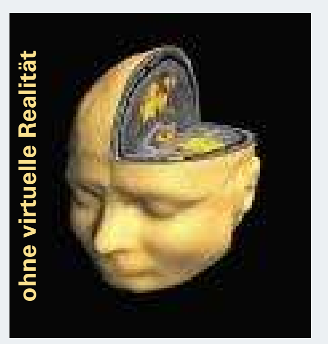
Beide Jungen hatten ihre übliche Dosis an Opioiden erhalten und verbrachten zusätzlich einen Teil der Behandlung mit der virtuellen Wirklichkeit, einen anderen, ebenso langen mit einem beliebten Nintendo-Videospiel. Das verwendete VR-Programm SpiderWorld diente ursprünglich zur Behandlung von Spinnenphobien, mit der wir uns ebenfalls befassen. Wir wussten deshalb, dass es sehr realistisch wirkt und Menschen fesselt; VR-Experten sprechen von »immersiv«. Außerdem zeigt das Programm keine körperlichen Nebenwirkungen wie etwa eine Art Seekrankheit, hervorgerufen durch eine Störung des Gleichgewichtssinns, wenn das Gesehene und das mit diesem Sinn Gespürte nicht übereinstimmen.

Die Patienten trugen einen so genannten Datenhelm, der räumlich wirkende Computerbilder stereoskopisch und entsprechend zur Kopfposition auf kleinen Monitoren präsentiert; diese Maske versperrt normalerweise zudem die Sicht auf die reale Außenwelt. Beide Patienten gingen durch die Illusion einer Küche mit Arbeitsflächen, einem Fenster und Schränken, die geöffnet werden können. Dort hinein projizierte die Software eine Vogelspinne. Zur Verstärkung der Illusion hängten wir jeweils eine haarige Spielzeugspinne mit wackelnden Beinen über das Bett, die der Patient anfassen konnte.

Beide Jugendlichen klagten über schwere bis unerträgliche Schmerzen während des Nintendospiels, doch in der SpiderWorld stuften sie die Pein auf einer Hunderterskala deutlich geringer ein. Eine Folgestudie mit zwölf Verbrennungspatienten im Harborview Burn Center ergab: Der Schmerz war in der

Schmerzverarbeitung im Gehirn

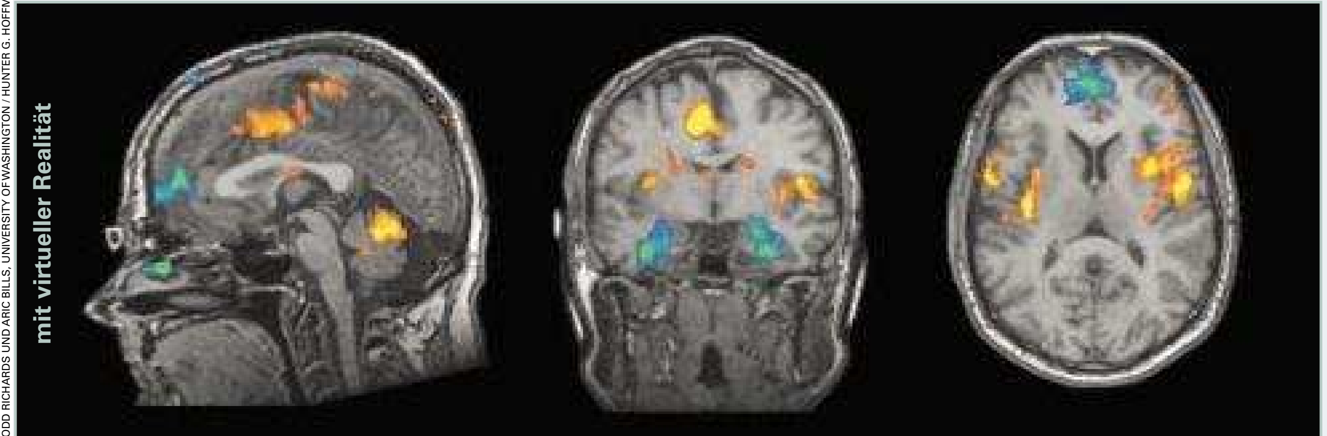
Die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT) macht Gehirnaktivität sichtbar. Wurden Freiwilligen über Heizelemente Reize verabreicht, sprachen Hirnregionen stark darauf an, die bekanntermaßen mit der Schmerzwahrnehmung befasst sind. Durften sich die Probanden in einer virtuellen Realität bewegen, ging diese Aktivität deutlich zurück.











TODD RICHARDS UND ARIC BILLS, UNIVERSITY OF WASHINGTON / HUNTER G. HOFFMAN

virtuellen Spinnenwelt nicht einmal halb so stark wie unter Opioiden.

Dieses eindeutige Resultat lässt sich im Grunde leicht erklären. Unser Gehirn kann nur eine begrenzte Zahl an Informationen gleichzeitig verarbeiten. Um die Fülle an Signalen aus verschiedenen Sinneskanälen zu bewältigen, konzentriert es sich auf einige und blendet andere aus. Widmet ein Patient seine ganze Aufmerksamkeit virtueller Wirklichkeit, stellt das alles andere in den Schatten. Er registriert oft weniger, dass ihm etwas weh tut, und befasst sich auch weniger mit der Wunde und ihrer Behandlung.

Um diese Therapie noch zu verbessern, hat unser Team ein VR-Programm ganz auf diese Patientengruppe zugeschnitten. Finanziert wurde »SnowWorld« von dem Microsoft-Mitbegründer Paul G. Allen und den Nationalen Gesundheitsinstituten in Bethesda (Maryland). SnowWorld vermittelt die Illusion, durch treibende Schneeflocken über eine eisige Schlucht zu fliegen; Eisschollen auf einem Fluss und ein Wasserfall verstärken den Eindruck von Kälte (siehe Bild S. 76). Damit wollen wir das auflodernde Feuer der Erinnerung löschen – viele Patienten denken während der Wundversorgung an ihren Unfall und durchleben die traumatische Situation erneut. Zur Intensivierung bietet SnowWorld auch eine spielerische Komponente: Während die Patienten durch die virtuelle Schlucht schweben, können ▷

sie mit Schneebällen nach allerlei Zielen werfen. Treffen sie Schneemänner oder Iglus, verschwinden diese in einer Wolke von Schnee, Pinguine fallen mit einem Quaken auf den Kopf und von Robotern bleibt nur ein Haufen Metall.

Um die schmerzlindernde Wirkung künstlicher Computerwelten eingehender zu untersuchen, testeten wir unter anderem 22 gesunde Probanden, denen eine Blutdruckmanschette zehn Minuten lang den Arm zusammenpresste. Alle zwei Minuten baten wir um eine Einstufung der damit einhergehenden Schmerzen. Wie erwartet, wuchs das Unbehagen zunächst. Doch während der letzten zwei Minuten kam jeder Teilnehmer in den Genuss von SpiderWorld und ChocolateWorld. In dieser »süßen« Welt erscheint ein virtueller Schokoriegel, der über eine Positionsmessung mit einem wirklichen Riegel gekoppelt ist; während dieser verspeist wird, erscheinen auf dem virtuellen Snack Bissstellen. Und wieder verringerten sich Schmerzen während dieser Zeit drastisch.

Wie so oft gilt: Die Qualität macht's. In einer weiteren Studie peinigten wir 39 gesunde Probanden dreißig Sekunden lang mit einem elektrischen Heizelement am rechten Fuß. Bei jedem Einzelnen hatten wir zuvor eine maximal erlaubte Temperatur ermittelt. Während zwanzig der Teilnehmer bei dem Hitzereiz in den Genuss der voll interaktiven Ausgabe von SnowWorld kamen, ausgestattet mit einem hochwertigen Datenhelm, der auch Geräuscheffekte einspielte, erhielten die anderen einen schlechteren Helm, der keine Lautsprecher besaß und auch den Blick auf die Außenwelt freigab. Mangels Positionssensor konnte der Computer bei diesen Probanden zudem keine aktuelle Blickrichtung ermitteln, sodass ihre Perspektive in der virtuellen Welt nicht mit der realen Kopfstellung übereinstimmte. Obendrein ließen wir ihnen keine Interaktionsmöglichkeiten, sie konnten also nicht mit Schneebällen um sich werfen. Wie nicht anders zu erwarten, zeigte sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Güte der Illusion und der Schmerzlinderung.

VR in der Röhre

Dieses experimentelle Setting verwendeten wir auch zusammen mit Kollegen, um eine weitergehende Frage zu beantworten: Bewerten die Probanden Schmerz nur anders, wenn die Computerwelten sie ablenken, oder wird die relevante Hirnaktivität tatsächlich gedrosselt? Diese Variante unseres Experiments erforderte allerdings erhebliche technische Modifikationen. Denn das für die Patienten verträglichste Verfahren, die Frage zu beantworten, ist die so genannte funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT; siehe auch »Wissenschaft im Alltag«, S. 46). In den starken Magnetfeldern dieser diagnostischen Geräte verbieten sich magnetisierbare Objekte ebenso wie Strom führende Leitungen. Die Datenbrille musste neu konstruiert werden, Licht leitende Glasfasern transportierten die computergenerierten Bilder.

Unsere Probanden litten während der kurzen ablenkungsfreien Phase unter starkem Unbehagen und Schmerz, der auch ihr Denken fast völlig einnahm. Wie erwartet, zeigten die fMRT-Aufnahmen eine entsprechende Aktivierung in fünf bekanntermaßen mit der Schmerzwahrnehmung befassten Regionen des Gehirns: der Insula, dem Thalamus, dem primären und sekundären somatosensorischen Cortex und dem gefühlsbetonten Teil des vorderen cingulären Cortex (siehe Aufnahmen im Kasten auf S. 79). Erlebten die Freiwilligen aber SnowWorld während des Hitzereizes, reduzierte das deutlich die zuvor erhöhte Hirnaktivität. Die Ergebnisse der fMRT lassen vermuten, dass virtuelle Wirklichkeit nicht einfach die Deutung der einlaufenden Schmerzsignale betrifft, sondern ihre Wahrnehmung tatsächlich verringert.

Unsere Ergebnisse ermutigten inzwischen zwei große regionale Kliniken für Brandverletzungen, SnowWorld während der Versorgung schwerer Brandwunden zu erproben – das William Randolph Hearst Burn Center in New York und das Shriners-Kinderkrankenhaus in Galveston (Texas). Derzeit arbeitet Ari Hollander, ein Partner von HIT Lab, an einer neuen Version, die noch immersiver wirkt: SuperSnowWorld. Diese künstliche Welt kann von zwei Menschen gleichzeitig besucht werden. Der Patient und eine Person seines Vertrauens, bei Kindern meist die Mutter, sind durch virtuelle Abbilder präsent und kämpfen gemeinsam gegen Eismonster. Das Hearst und das Harborview Burn Center werden das System kostenlos medizinischen Zentren zur Verfügung stellen.

Unser Team untersucht außerdem, ob virtuelle Wirklichkeit während einer Blasenspiegelung mit starrem Endoskop

Ein Bistro, eine Bushaltestelle – eine alltägliche Szene: Doch plötzlich wird ein Bus von einer Bombe zerfetzt. Solche Terroranschläge fordern nicht nur Tote und Schwerverletzte. Auch die psychischen Wunden müssen versorgt werden, sonst drohen posttraumatische Belastungsstörungen. Virtuelle Realität bietet die Möglichkeit, in immer realistischeren Bildern und Geräuschen schrittweise die lähmenden und schrecklichen Gefühle, die mit dem traumatischen Geschehen verbunden sind, zu verarbeiten.







ARI HOLLANDER, IMPRINT INTERACTIVE TECHNOLOGY / HUNTER G. HOFFMAN


ERIK S. LESSER

Auch die Angst vor öffentlichem Reden kann mit virtueller Wirklichkeit behandelt werden: In künstlichen Welten macht sich der Patient mit der beängstigenden Situation vertraut.

Erleichterung bringt, gegen Schmerzen und Angst hat sie sich nach einer unserer Studien bereits bewährt. Bruce Thompson und Emily Steele von der Universität von Südaustralien in Mawson Lakes testen virtuelle Wirklichkeit ebenfalls zur Schmerzbekämpfung: Wer auf Grund zerebraler Kinderlähmung an Muskeln und Sehnen operiert wird, muss sich anschließend einer Physiotherapie unterziehen. Um das Gehen zu üben, werden Beinmuskeln gestreckt und gedehnt, doch das bereitet starke Schmerzen.

Eine ganz andere therapeutische Anwendung immersiver Computerwelten ist die Bekämpfung krankhafter Ängste. Hier geht es nicht um Ablenkung von einer schmerzhaften Realität, sondern um die Konfrontation der Patienten mit den Auslösern ihrer Phobien. Das Verfahren wurde in den 1990er Jahren von zwei Forschern eingeführt: Barbara O. Rothbaum an der Emory-Universität in Atlanta (Georgia) und Larry F. Hodges, mittlerweile an der Universität von North Carolina in Charlotte. Sie behandelten auf diese Weise Höhen- und Flugangst, Furcht vor öffentlichem Reden und chronische posttraumatische Belastungsstörungen von Vietnamkriegsveteranen. Gemeinsam mit Albert Carlin vom HIT Lab und Azucena Garcia-Palacios von der Universität Jaume I. (Spanien) setzen wir die VR bei Spinnenphobien ein.

Wie wirkungsvoll das Verfahren sein kann, demonstrierte unsere erste Patientin. Sie litt seit fast zwanzig Jahren unter dieser Angststörung. Als Folge hatten sich zudem Zwangsneurosen entwickelt: Regelmäßig räucherte sie ihr Auto mit Rauch und Insektenvernichtungsmitteln aus, klebte nachts die Schlafzimmerfenster ab, nachdem sie den Raum auf Spinnen untersucht hatte. Gewaschene Kleidung musste sie in Plastiktüten versiegeln, um eine »Kontamination« mit den Tieren zu vermeiden. Wo immer sich die Patientin aufhielt, suchte sie ihre Umgebung ängstlich nach den Achtbeinern ab. Doch erst als es ihr widerstrebte, das Haus zu verlassen, begab sie sich endlich in Therapie.

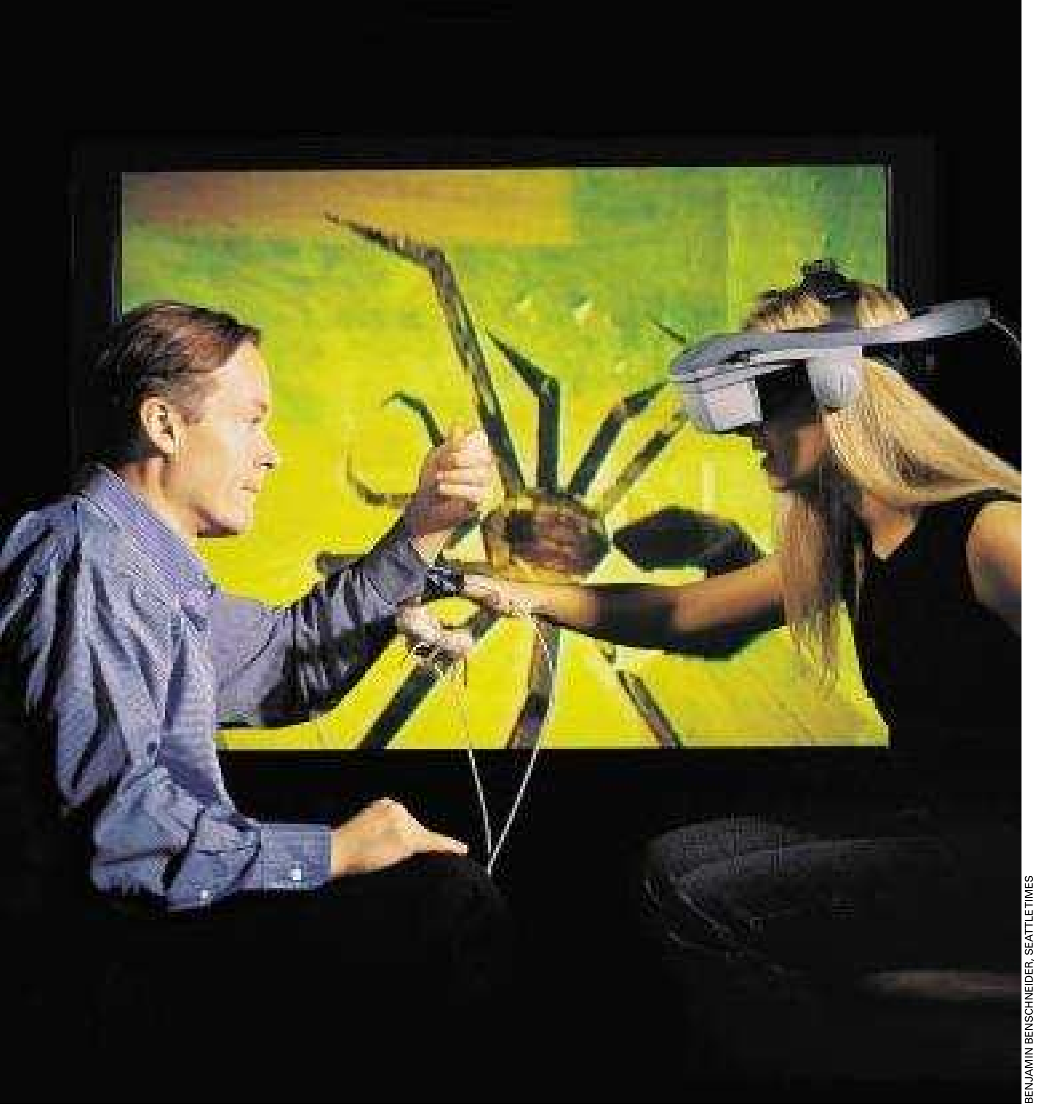
Wie bei anderen Konfrontationstechniken wird auch in der VR-Therapie die phobische Person schrittweise an das gefürchtete Objekt oder die Angst auslösende Situation herangeführt, damit die Furcht allmählich nachlässt beziehungsweise die Sicherheit wächst. Deshalb präsentieren wir während der ersten Sitzungen die schon erwähnte Illusion einer Vogelspinne in einer virtuellen Küche, doch in großem Abstand zum Patienten. Der kann sich dem haarigen Tier, so weit es ihm möglich ist, nähern. Dazu dient ein Joystick, mit dem er in der dreidimensionalen Szene navigiert. Das Ziel auf dieser Behandlungsstufe ist: auf Armlänge herankommen.

In den weiteren Sitzungen erfasst ein Datenhandschuh die Stellung der Hand, die dann in der Illusion erscheint. »Berührt« der Patient die virtuelle Spinne, gibt sie ein Geräusch von sich und flüchtet einige Zentimeter. Als Nächstes kann der Patient mit seiner Cyberhand eine virtuelle Vase hochheben, aus der eine Spinne fällt und auf den Boden der virtuellen Küche schwebt. Um diese Alltagsszene noch zu verstärken, spielen wir die aus Hitchcocks »Psycho« bekannten und in Horrorfilmen häufig verwandten schrillen Klangfetzen ein. Die Teilnehmer wiederholen jede Aufgabe, bis sie kaum noch Angst empfinden. Danach geht es weiter zur nächsten Herausforderung. Im letzten Abschnitt der Therapie koppeln wir virtuelle und reale Erfahrung: Vor dem Patienten hängt eine Spielzeugspinne mit einem Positionssensor, er kann sie also fühlen, während er sie im Cyberspace anfasst.

Schon nach zehn Sitzungen von je einer Stunde war unsere erste Patientin fast angstfrei und ihre Zwangsneurosen verflüchtigten sich. Sie war sogar in der Lage, eine echte Vogelspinne mehrere Minuten lang zu halten und ein Stück über ihren Arm krabbeln zu lassen. Von 23 Patienten einer weiterführenden Studie erlebten 19 eine deutliche Besserung. Konnten sie sich zuvor einem Käfig mit einer Vogelspinne nicht ohne Horror auf drei Meter nähern, vermochten die meisten nun sogar den Deckel des Käfigs mit mäßigen Angstgefühlen zu berühren; einige Patienten konnten ihn sogar anheben. Mittlerweile haben Dutzende von Studien die Wirksamkeit der VR-Therapie bei bestimmten Phobien gezeigt. In virtuellen Flugzeugen konfrontieren sich Patienten mit Flug- und Höhenangst, vor simuliertem Publikum üben sie das angstfreie Sprechen in der Öffentlichkeit. In den USA und Spanien gibt es bereits kommerzielle Software, die Psychologen und Psychiater leasen können.

Hilfe für Terroropfer

Ähnliche Programme können in die Therapie eines besonders schwer wiegenden psychologischen Krankheitsbilds eingebaut werden, der posttraumatischen Belastungsstörung (englisches Kürzel: PTSD). Krieg, Terrorangriffe und Katastrophen hinterlassen tiefe seelische Wunden. Zu den Symptomen gehören plötzliche Rückblenden auf das traumatische Geschehen, heftige Reaktionen, wenn etwas daran erinnert, Vermeidungsverhalten, emotionale Stumpfheit und Reizbarkeit. Das soziale Leben und die berufliche Leistung der Patienten leiden. Diese Störung ist eine weit größere therapeutische Herausforderung als eine genau umrissene Phobie. Kognitive Verhaltensthe- ▷



BENJAMIN BENSCHNEIDER, SEATTLE TIMES

SpiderWorld ist eine virtuelle Welt gegen Spinnenphobie. Die Patientin trägt einen Videohelm, der ihr in der Szenerie einer Küche eine Vogelspinne zeigt. Um in einem fortgeschrittenen Stadium der Behandlung eine fühlbare Rückkopplung zu geben, misst das Programm die Stellung der Hand zu einer Spielzeugspinne (gehalten vom Autor).

▷ rapien haben sich als sehr erfolgreich erwiesen. In kleinen Schritten setzt man einen Patienten beispielsweise Reizen aus, die Erinnerungen an das Ereignis wachrufen. Dann lernt er, die aufkommenden Gefühlen zu verarbeiten und mit den unerwünschten Reaktionen umzugehen. Zurzeit wird untersucht, ob sich mit der virtuellen Wirklichkeit diese Therapie weiter vereinheitlichen lässt; vielleicht hilft sie auch bei Kranken, die nicht auf das etablierte Schema ansprechen.

Cybertherapie ohne Nebenwirkungen

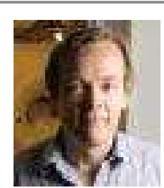
JoAnn Difede von der Cornell-Universität in Ithaca (New York) hat mit mir ein solches Verfahren für eine junge Frau entwickelt, die sich während der Angriffe vom 11. September 2001 in der Nähe des World Trade Center aufhielt. Während der Therapie trug sie einen Datenhelm. Die Animationen, die wir ihr vor Augen führten, begannen mit virtuellen Jets, die über die Türme des Center flogen. In einer späteren Stufe stürzen sie darauf, begleitet von virtuellen Explosionen und Geräuscheffekten. Die Szenen, die das Programm in den letzten Sitzungen zeigte, waren grauenhaft realistisch: Menschen, die aus den brennenden Gebäuden sprangen, begleitet von Sirenen und Schreien. Unsere Patientin fühlte sich nach der Therapie deutlich besser, die Symptome samt Depression waren dauerhaft zurückgegangen. Zwei andere Kliniken setzen das Verfahren nun bei ihren Patienten des 11. September ein. Zusammen mit einem Team um Patricia L. Weiss von der Universität Haifa (Israel) entwickle ich zudem eine VR-Welt für Menschen, die nach Bombenanschlägen an PTSD leiden.

Anders als bei Phobien ist die Wirksamkeit der Cybertherapie bei Belastungsstörungen noch nicht durch kontrollierte Studien bewiesen (darin werden Patienten nach einem Zufallsprinzip für unterschiedliche Therapien ausgewählt, um die Ergebnisse objektiv vergleichen zu können). Führende Experten haben aber begonnen, die Vorzüge der Technologie auszuloten, und ihre vorläufigen Ergebnisse sind so ermutigend wie unsere Erfahrungen damit.

Große klinische Studien stehen auch zur Schmerzlinderung bei Brandopfern noch aus. SnowWorld hat bislang immerhin kaum Risiken oder Nebenwirkungen offenbart. Da die Patienten stets die übliche Dosis Opioide erhalten, sind sie mit VR-Therapie auf keinen Fall schlechter dran als ohne. Wenn das Verfahren aber nachweislich wirkt, ließe sich die Schmerzmitteldosis vielleicht sogar reduzieren oder die Versorgung der Wunden intensivieren. In letzterem Fall könnte der Patient die Klinik schneller verlassen, was die Behandlungskosten senkt.

Zwar sind hochwertige VR-Systeme, wie wir sie zur Linderung extremer Schmerzen empfehlen, noch teuer, doch die Preisentwicklung auf dem Computermarkt lässt hoffen. Für harmlosere Fälle etwa beim Zahnarzt genügen ohnehin einfachere und damit kostengünstigere Systeme. Ähnliches gilt für Phobien. Wenn auch die von uns und unseren Kollegen eingesetzten künstlichen Welten bei Weitem nicht so realistisch wirken wie die in Matrix, sind sie doch schon so ausgereift, dass Menschen darin Hilfe finden können. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Der Kognitionspsychologe **Hunter G. Hoffman** leitet das Virtual Reality Analgesia Research Center am HIT Lab der Universität Washington in Seattle. Dort forscht er über die therapeutischen Möglichkeiten, die Computerillusionen Schmerzpatienten und Patienten mit psychischen Problemen bieten.

Virtual reality technology. Von Grigore C. Burdea und Philippe Coiffet. Jon Wiley & Sons, 2003

Virtual reality exposure therapy for World Trade Center post-traumatic stress disorder: A case report. Von JoAnn Difede und Hunter G. Hoffman in: CyberPsychology & Behaviour, Bd. 5, Heft 6, S. 529, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Unterkühlte Operation

»Ärzte und Kühlfachleute haben in der südschwedischen Stadt Lund einen beachtenswerten Fortschritt auf dem Gebiet der Gehirnchirurgie mit Untertemperaturen erreicht. Nach mehreren Jahren Vorbereitungsarbeit … wurden 13 Operationen an Patienten bei einer Körpertemperatur von 25° C vorgenommen. Dabei vermindert sich der Blutdruck des Patienten … und es tritt so gut wie keine Blutung ein. Nach der Operation wird der Patient in eine Wärmekammer überführt, in der er in einem Luftstrom von 30° C allmählich aufgewärmt wird.« *(Deutsche Erfinderpost, 7. Jg., Nr. 7/8, S. 13, 1955)*

Tumoren bei Pflanzen

»Den ersten positiven Beweis, daß die bei Atomumwandlungen frei werdende energiereiche Strahlung Tumoren bei Pflanzen hervorrufen kann, haben Arnold H. Sparrow und Lloyd A. Schairer von dem Brookhaven National Laboratorium in Upton, N. Y., geliefert. Damit ist die Vermutung, Tumoren könnten auch bei pflanzlichen Lebewesen durch radioaktive Strahlung hervorgerufen werden, bestätigt. Die beiden Forscher setzten Tabakpflanzen der außerordentlich harten γ-Strahlung von Kobalt-60 aus. Nach einer gewissen Zeit wurden die Pflanzen von einer graugrünen tumorösen Masse überwuchert und starben innerhalb weniger Wochen ab.« *(Orion, 10 Jg., Nr. 13/14, S. 583, Juli 1955)*

Fernsehen unter Wasser

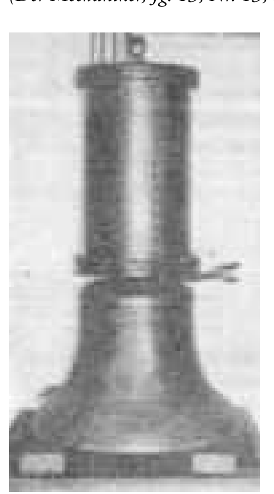
»Die ›Wädenswil‹ trug eine vollständige Einrichtung mit einer ›Comet‹-Kamera, die bis zu einer Wassertiefe vom 1100 m verwendet werden darf. Der Vorzug einer solchen Einrichtung gegenüber dem Einsatz des Tauchers ist die wesentlich größere Wassertiefe … und die Möglichkeit, das Unterwassergeschehen einem größerem Kreis von Fachleuten an Bord … sichtbar zu machen … Die Unterwasserkamera ist in einem zylindrischen, druckfesten Gerät untergebracht … Fokus, Linsenöffnung und Linsenwechsel werden ferngesteuert … In einiger Zeit wird ein Steuergerät für die vollautomatische … Steuerung … lieferbar sein.« *(Funkschau, 27. Jg., 2. Juli-Heft, Nr. 14, S. 297, 1955)*



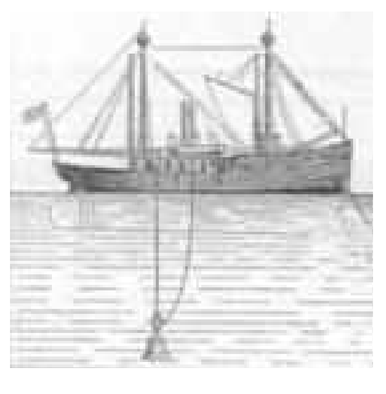
▲ Die steuerbare Unterwasserkamera »Comet« hilft bei der Suche nach Wracks.

Akustischer Unterwasser-Leuchtturm

»Die Submarine Signal Co. in Boston hat einen Signalapparat konstruiert, der das mit dem Empfangsapparat ausgerüstete Schiff schon auf große Entfernungen auf das mit dem Sendeapparat versehene Feuerschiff oder die Boje aufmerksam macht. Als Sendeapparat dient eine schwere Glocke, die unter der Wasseroberfläche an einem Feuerschiffe oder einer Boje hängt und deren Klöppel … in Bewegung gesetzt wird … Die beiden im dem Schiffsraum … eingebauten Empfangsapparate … werden von den ankommenden Schallwellen in Vibration versetzt … Das Schiff, das sich auf einem gefährlichen Kurse befindet, hört den Ton der Unterwasserglocke und … aendert seinen Kurs.« *(Der Mechaniker, Jg. 13, Nr. 13, S. 156, Juli 1905)*



◀ Mit Vibrationen warnt die Unterwasserglocke Schiffe vor einem gefährlichen Kurs.



Automatischer Stationsanzeiger

»In der Berliner städtischen Straßenbahn ist ein Apparat in die Wagen eingebaut, der die Namen der Stationen, sobald sich der Wagen ihnen nähert, erscheinen läßt … Die in ihrem Aeußeren einem hölzernen Schränkchen gleichende Vorrichtung mit Glasscheibe ist … über der Tür angebracht, so daß der … Name der nächsten Haltestelle von jedem Fahrgast gesehen werden kann.



Die … Vorrichtung besteht aus zwei Walzen, über welche sich ein breites Band mit den Namen der Haltestellen auf- und abrollt. Ein Triebwerk, das … durch einen Elektromagneten ausgelöst und gesperrt wird, bewirkt das Drehen der Walzen.« *(Der Mechaniker, Jg. 13, Nr. 14, S. 170, Juli 1905)*

Ursache von Heufieber

»Vor einiger Zeit stellte Dunbar durch Versuche an Heufieberkranken und an Gesunden fest, daß die nächste Ursache des Heufiebers die Einwirkung von Gräserblütenstaub (Pollen) auf die Schleimhäute ist … Er konnte aus den Stärkestäbchen, die sich im Gräserpollen finden, einen im Blutserum löslichen Stoff darstellen … Dunbar spritzte nun das Gift Kaninchen ein und verwendete versuchsweise das Serum der Tiere als Antitoxin … Es zeigte sich, daß durch die Einspritzung des Antitoxins eine vorübergehende Immunität der Heufieberkranken gegen das Pollengift sich erreichen ließ.« *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 162, S. 110, Juli 1905)*

Uralte Gene für neue Getreidesorten

Schneller und gezielter als früher, aber dennoch nach ähnlichem Prinzip, züchten Genetiker verbesserte Getreidesorten. Erlebt die Menschheit bald eine neue Grüne Revolution?

Von Stephen A. Goff und John M. Salmeron

Bauern beobachten ihre Felder und das Wetter seit jeher argwöhnisch. Über Jahrtausende gaben sie Acht, wie sie die beste Ernte erzielten. Uralt ist die Erfahrung, dass sich immer wieder einzelne Pflanzen anders verhalten, zum Beispiel ungünstige Wetterperioden besser aushalten, einer Krankheit widerstehen oder mehr Ertrag bringen als andere. Solche Eigenschaften versuchten die Bauern dann zu bewahren und mit anderen Vorteilen zu kombinieren, indem sie die guten Pflanzen auslasen und miteinander kreuzten. Weil sie aber in ihre Pfleglinge nicht hineinsehen konnten, war die Zucht verbesserter Sorten oft langwierig und voller Rückschläge.

Trotzdem funktionierte die Methode bemerkenswert gut. Nachdem Menschen vor rund zehntausend Jahren anfingen, sich vom Ackerbau zu ernähren und zu dem Zweck geeignete Pflanzen zu domestizieren, bewirkte die neue Art der Nahrungsbeschaffung bald eine Bevölkerungsexplosion. Heute wächst die Menschheit mehr denn je, und nur stetige Steigerungen der Ernteerträge können die Weltbevölkerung zukünftig ernähren.

Das Füllhorn der Wildgräser

Die globale Agrarproduktion beruht heutzutage zu 99 Prozent auf nur 24 Nutzpflanzenarten. Davon stehen die drei Getreide Reis, Weizen und Mais als Lieferanten von Nahrungsenergie an vorderster Stelle. Schon jetzt beläuft sich deren Ernte auf je über eine halbe Milliarde Tonnen im Jahr. Die Menge müsste in den nächsten fünfzig Jahren jährlich um weitere eineinhalb Prozent steigen, wollte man jedem der dann voraussichtlich neun Milliarden Menschen wenigstens so viel von diesen Getreiden bereitstellen wie uns heute – pro Kopf zwischen knapp einem halben und eineinhalb Kilogramm täglich. Dabei ist noch zu berücksichtigen, dass dafür zukünftig weniger Ackerfläche zur Verfügung stehen wird als heute. Das bedeutet, die Ausbeute pro Fläche muss sich weiter erhöhen.

Zwar glauben Agronomen, dass das Ertragspotenzial der Feldfrüchte noch nicht ausgeschöpft ist. Aber es erfordert den fortgesetzten internationalen Einsatz der Wissenschaft, dieses Potenzial zu finden und zu wecken. Unter anderem macht die Entdeckung Hoffnung, dass in den Vorfahren unserer Kulturpflanzen offenbar viele Lösungen – sprich bessere genetische Varianten – verborgen liegen. Das gilt offenbar auch für die Gräser.

Nach neueren molekularen und genetischen Untersuchungen sind die kultivierten Getreidegräser – also neben Weizen, Reis und Mais auch Gerste, Hirse, Sorghum und andere – untereinander viel enger verwandt als bisher angenommen. Viele ihrer Gene und molekularen Mechanismen ähneln sich. Für die Zucht bringt das den Vorteil, dass wissenschaftliche Befunde an einer der Arten für die Verbesserung der anderen genutzt werden können. Insbesondere ▷



KAY CHERNUSH

Mit modernen Testverfahren können Pflanzenzüchter wichtige genetische Anlagen bereits an sehr jungen Pflanzen erkennen, wie an solchen Reis-pflänzchen.

lässt sich aber auch die ungleich größere genetische Vielfalt der Ahnen unserer Getreide anzapfen. Offenbar enthalten die Wildformen reichlich verborgene genetische Eigenschaften, die bei Einkreuzung in die heutigen Hochleistungssorten deren Ertrag steigern können.

Vor ungefähr 50 bis 70 Millionen Jahren spalteten sich die verschiedenen evolutionären Linien der Vorfahren unserer Getreide, die alle von derselben Vorläufergrasart stammen, voneinander ab und besiedelten dabei verschiedene Regionen der Welt. Viel später nahm der Mensch diese Gräser in Kultur. Unseres Wissens machten Bauern im Nahen Osten, im Gebiet des »fruchtbaren Halbmonds«, den Anfang, als sie vor rund zehntausend Jahren Weizen zu domestizieren begannen. Schätzungsweise tausend Jahre später setzte im Süden des heutigen Mexiko die Kultivierung von Mais ein. Und auch schon vor über achttausend Jahren legten in Ostasien Vorfahren der Chinesen die ersten Reisfelder an.

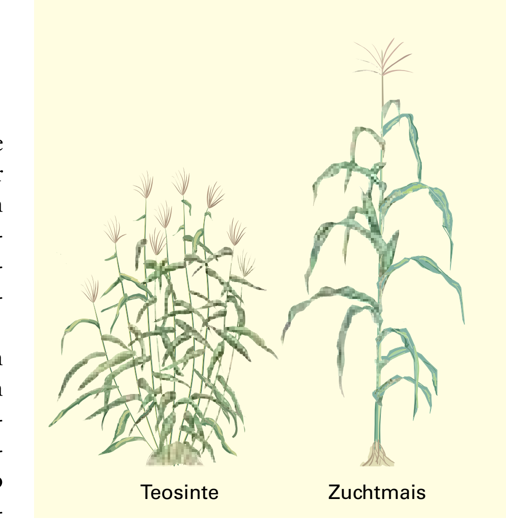
Frühe Bauern als versierte Getreidezüchter

Schon unsere Ahnen züchteten die heute bekannten Getreide heraus. Ihre Vorgehensweise dabei ähnelt in vielem der modernen Pflanzenzucht. Die frühen Bauern wählten aus dem vielfältigen Erscheinungsbild der Wildgräser einzelne Varianten mit günstigen Eigenschaften, die sie dann selektiv vermehrten und mit anderen günstigen Varietäten kreuzten oder in bereits verbesserte Linien einbrachten. Hierbei achteten sie beispielsweise auf größere Körner oder größere Ähren. Auch bevorzugten sie Pflanzen, die ihre Samen nicht ausstreuten, denn solches Korn war leichter zu ernten – auch wenn das Getreide sich nun nicht mehr selbst aussäte. Andere Zuchtziele der frühen Ackerbauern betrafen die Ernährungsqualität der Körner – etwa den leichteren Verzehr bei einer dünnen Schale – oder die Eignung der Stärke für die Verarbeitung zu Fladenbroten. Mit der Zeit veränderten sie diese Gräser so stark, dass die Kulturformen der Wildpflanze immer weniger ähnelten und sich beide schließlich kaum noch von selbst miteinander kreuzten. Der Mais ist dafür ein eindrucksvolles Beispiel: Die Wildform, die Teosinte – auch Guatemalagras genannt –, sieht so völlig anders aus, dass die Abstammung erst vor Kurzem geklärt werden konnte (siehe Bild oben). Der Name stammt vom aztekischen *teotl* für »Gott« und *centli* für »Kornähre«.

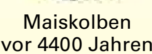
Seit den Anfängen des Ackerbaus hat der Mensch niemals aufgehört, sein Getreide durch gezielte Vermehrung günstiger Sorten und Einkreuzung erwünschter Eigenschaften seinen Bedürfnissen anzupassen und immer weiter zu optimieren. Im 20. Jahrhundert beispielsweise erzielte man teils beträchtliche Ertragssteigerungen durch die Zucht größerer Ähren, Kolben oder Rispen. Doch natürlich drücken Wind und Wetter Pflanzen mit überschweren Fruchtständen leichter zu Boden. In Reaktion darauf kreuzten die Agronomen in die Hochertragssorten Kurzhalmigkeit ein. Die »Grüne Revolution« der 1960er Jahre wiederum verdankten wir weit gehend der Züchtung auf Schädlingsresistenz, Stresstoleranz gegen extreme Umweltfaktoren und eine bessere Stickstoffdüngerverwertung der Pflanzen. Der Erfolg war beträchtlich. So wuchsen die Flächenerträge von Mais in den USA seit 1950 fast auf das Vierfache.

Der Getreideboom jener Jahrzehnte fußte noch großenteils auf den im Prinzip gleichen Zuchtmethoden wie bei den ersten Ackerbauern. Vor allem richteten sich die Züchter bei ihrer Auswahl geeigneter Linien nach direkt sichtbaren äußeren Merkmalen – so genannten äußeren Markern – wie der Korngröße oder der Statur der Pflanzen. Dabei selektierten schon die frühen Bauern unwissentlich die entscheidenden Genvarianten oder Allele, die charakteristische Merkmale der Zuchtformen bestimmen.

Das zeigt etwa eine genetische Studie an domestiziertem Mais aus vorgeschichtlicher Zeit, die eine Gruppe um Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig durchführte. Das Team untersuchte eine Reihe von Genen in 4400 Jahre alten Maiskolben aus Mexiko, also aus dem Umfeld jener Gegend, wo die Kultivierung dieses Getreides wahrscheinlich







NINA FINKEL (ZEICHNUNGEN); JOHN DOEBLEY (FOTOS)

Mais wurde anscheinend im Süden Mexikos aus dem Gras Teosinte gezüchtet. Durch Auswahl der angebauten Pflanzen selektierten die frühen Bauern Varianten von Genen, die auch heute noch Merkmale wie das Verzweigungsmuster und die Kornstruktur beeinflussen. Schon früh hatten sie die harte Fruchtschale weggezüchtet und einen Kolben mit dicken Körnern und guter Stärkequalität erzeugt.

IN KÜRZE

- Die Getreide sind **genetisch eng verwandt**. Sie ähneln sich auch in vielen für sie typischen Genen, denn der Mensch züchtete sie von Anfang an auf ähnliche Eigenschaften.
- In der modernen Getreidezucht können Agronomen schnell und direkt – schon an der Jungpflanze – mit Hilfe von **genetischen Markern** beobachten, welche Gene eingekreuzt sind.
- Die ursprünglichen Wildgräser trugen – und tragen heute noch – ein vielfach größeres **Reservoir an genetischen Varianten** als ihre domestizierten Verwandten. Diese Gene vermitteln bei den Kultursorten oft unerwartet eine Ertragssteigerung.

angefangen hatte. Den Ergebnissen der Forscher zufolge enthielt der frühe Mais für einige typische Merkmale schon die gleichen Allele wie die späteren domestizierten Sorten. Diese Genvarianten kontrollieren beispielsweise die Verzweigung der Pflanze sowie die Qualität von Proteinen und Stärke. In Populationen der Teosinte, der wilden Stammform von Mais, enthalten hingegen nur sieben bis 36 Prozent der Pflanzen die entsprechenden Allele. Demnach gelang schon den ersten mexikanischen Bauern eine sehr effektive Auslese dieser charakteristischen Faktoren.

Beachtenswert ist auch, dass die frühen Züchter, auch wenn sie sich mit ganz verschiedenen Getreidearten befassten, dabei doch vielfach Mutationen der gleichen Gene oder Gengruppen selektierten. Das erkannten heutige Forscher, als sie im Genom der Pflanzen die Orte wichtiger genetischer Anlagen eingrenzten, sie also mittels Merkmalskartierung bestimmten Chromosomenregionen zuordneten. Wie wir erst heute verstehen, erklärt sich diese gleich geartete züchterische Selektion mit der auffallend ähnlichen Genomstruktur der Getreide, die noch nach einer seit Jahrmillionen getrennten Evolution besteht.

Vorbild Reisgenom

Mittlerweile haben die Forscher bei den verschiedenen Getreidearten einige tausend Genorte für wichtige Merkmale in dieser Weise kartiert. Das Ausmaß der Übereinstimmung – der Konservierung der genetischen Karten (fachlich: Syntenie der Gene) – erstaunt denn doch. Das Phänomen erlaubt, alle diese Gräser als ein einziges genetisches System zu betrachten. Wenn also bei einem Getreide günstige Gene oder Genfunktionen entdeckt werden, dürfte man das meist auch für die anderen Getreide nutzen können.

Allen voran sind solche Einsichten vom Reis zu erwarten, mit wissenschaftlichem Namen *Oryza sativa* genannt. Von allen Getreidesorten ist einzig das Genom von Reis bereits so gut wie vollständig sequenziert, das heißt die Abfolge der DNA-Bausteine – der so genannten Kernbasen – entziffert. Eine vorläufige Sequenz vom Genom der Unterart *O. sativa japonica* hat einer von uns (Goff) schon im Jahr 2002 zusammen mit einer Forschergruppe veröffentlicht. Dabei handelt es sich um diejenige Unterart, die in Japan und den USA am häufigsten angebaut wird. Hingegen publizierten chinesische Wissenschaftler eine grobe Genomsequenz der besonders in Asien verbreiteten Unterart *O. sativa indica*. Eine genaue Version aller zwölf Chromosomen von Reis erstellen die Mitarbeiter des Internationalen Reis-Genom-Sequenzierungsprojekts (IRGSP).

Für eine Erbgutanalyse eignet sich Reis besser als andere Getreide, denn er besitzt von allen das kleinste Genom. Es besteht nur aus 430 Millionen DNA-Basenpaaren. Das Genom von Mais ist dagegen mit rund drei Milliarden Basenpaaren etwa so groß wie das des Menschen. Das von Gerste enthält sogar fünf Milliarden und das von Weizen gar 16 Milliarden DNA-Basenpaare. Trotzdem erfolgt bereits die Sequenzierung des Genoms der Gerste, und auch die von Weizen wird schon vorangetrieben. Die entscheidende und schwierigere Arbeit nach erfolgter Sequenzierung ist, das Genom zu analysieren und die einzelnen Abschnitte sowie deren Funktionen genauer zu kennzeichnen. Beim Reis wurden schon einige zehntausend Gene gefunden. Wozu sie gut sind, ist damit allerdings noch nicht bekannt.

Am einfachsten lässt sich die Funktion eines Gens ermitteln, wenn man in existierenden Datenbanken nach Genen mit ähnlicher Sequenz sucht (Kasten S. 88, oben). Viele Gene – auch in Pflanzen – erfüllen so grundlegende Aufgaben in der Zelle, dass man nicht selten bei völlig anderen Organismen, oft selbst bei Mikroorganismen, ziemlich gleiche Erbanlagen findet. Reis scheint etwa 30 000 bis 50 000 Gene zu haben. Rund 20 000 davon ähneln bereits beschriebenen Genen mit bekannter Funktion – ihre Sequenzen sind offenbar homolog, also gleicher Abstammung. Den Wissenschaftlern gibt das Anhaltspunkte über ihre Rolle in der Reispflanze (Kasten S. 88, unten).

So dürften über tausend der Reisgene zur Abwehr von Krankheitserregern und Schädlingen dienen. Einige hundert Gene konnten der Synthese von Vitaminen, Kohlenhydraten, Lipiden (Fettver- ▷

Unveränderte Zuchtziele

Wuchs, Gestalt, Stresstoleranz und Nährstoffgehalt gehören zu den Merkmalen von Nutzpflanzen, die Züchter zu optimieren trachten. Ertragssteigerungen – das höchste Ziel der Agronomie – lassen sich auf verschiedene Weise erreichen: etwa durch mehr und größere Körner pro Pflanze, geringeren Platzbedarf der Einzelpflanze oder durch höhere Toleranz gegenüber dem Standort.

Wuchs
Menge und Größe der Körner
Ährengröße
Dauer der Reifung

Gestalt
Höhe
Verzweigung
Fruchtstand

Stresstoleranz
Dürre
Schädlinge
Krankheiten
Herbizide
starke Düngung

Nährstoffgehalt und -qualität
Stärke
Proteine
Fette
Vitamine

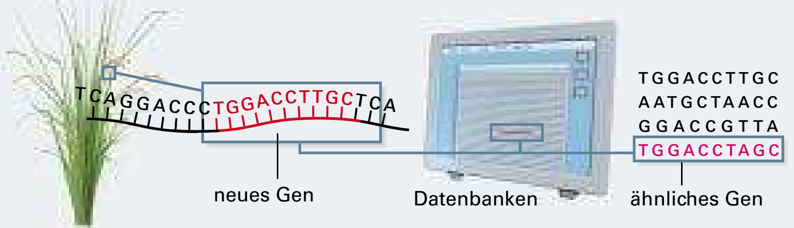


CORBIS / DOUG WILSON

Wunschgenen auf der Spur

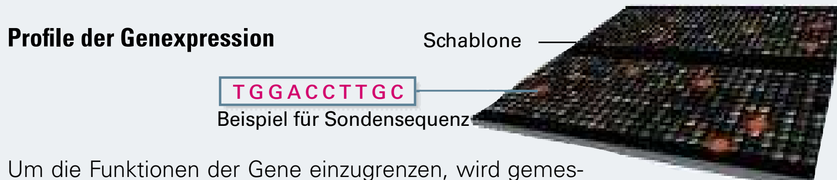
Der genetische Hintergrund für Eigenschaften von Pflanzen wird mit den gleichen Methoden ermittelt wie der von menschlichen Erbkrankheiten. Eine Kartierung kann den Genort auf einem Chromosom eingrenzen. Die Sequenzierung dieses Abschnitts liefert mögliche Genkandidaten. Die Funktion des gesuchten Gens wird mit den unten vorgestellten Verfahren ermittelt.

Durchsuchen von Datenbanken



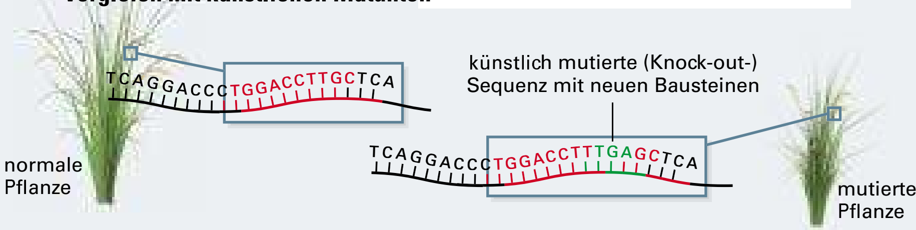
Ein Sequenzvergleich mit bekannten Genen kann irgendwo eine hochgradige Übereinstimmung mit einer in einer Datenbank gespeicherten Erbsequenz erbringen. 20000 der 30000 bis 50000 Gene von Reis ähneln bekannten und genauer untersuchten Genen anderer Organismen. Vermutlich erfüllen sie ähnliche Aufgaben.

Profile der Genexpression



Um die Funktionen der Gene einzugrenzen, wird gemessen, wann und wo sie jeweils in der Pflanze aktiv sind. Auf einer Schablone (Microarray) sind tausende verschiedene Sonden angeordnet, die jeweils die Umschrift eines bestimmten Gens – in eine Vorlage für Proteine – erkennen. Werden Zellaufschlüsse über die Schablone gespült, bleiben passende Genabschriften haften – erkennbar an einem Lichtsignal.

Vergleich mit künstlichen Mutanten



Die gezielte Ausschaltung von Genen kann zeigen, inwiefern die Pflanzen nun anders wachsen oder sich anders verhalten. Dazu werden spezielle kurze Sequenzen in das Gen eingebracht, die es inaktivieren.

Reisgene: vermutete Verteilung der Aufgaben

Mit den beschriebenen Methoden konnte vielen Genen von Reis schon grob ein Funktionsumfeld zugewiesen werden, hier dargestellt als Tortendiagramm.



▷ bindungen), Proteinen und anderen Inhaltsstoffen des Korns zugewiesen werden, die Reis zu einem wertvollen Nahrungsmittel machen. Aus dem Vergleich mit der genetisch bestuntersuchten Modellpflanze, der Acker-Schmalwand *(Arabidopsis thaliana)*, kennen wir außerdem viele Gene, die solche Stoffwechselwege steuern. Das verhalf auch dazu, etliche Erbanlagen zu identifizieren, die wichtige Stadien der Pflanzenentwicklung wie Blüten- und Samenbildung regulieren.

Einen Schritt weiter gehen Forschergruppen, die untersuchen, welche Gene in den einzelnen Geweben der Pflanze jeweils aktiv sind, also abgelesen werden (Kasten links, Mitte). So haben Wissenschaftler unserer Firma – Syngenta Biotechnology – 21 000 Gene der Reispflanze geprüft: Wie sie fanden, werden 269 davon vor allem während der Samenentwicklung abgelesen. Diese Gene könnten somit bei der Nährstoffzusammensetzung des reifen Korns entscheidend mitwirken.

Funktionstests mit ausgetricksten Genen

Man kann die Aufgabe eines Gens auch erforschen, indem man es durch den gezielten Einbau von Sequenzbausteinen außer Gefecht setzt, also inaktiviert (Kasten links, Mitte). Manchmal – längst nicht immer – sieht man der Pflanze die Mutation deutlich an. Aber man kann auch die Folgen für Entwicklung, Stoffwechsel und dergleichen zum Beispiel physiologisch oder biochemisch überprüfen. Oft zeigen erst eingehende Tests die Veränderung. Öffentliche und kommerzielle Einrichtungen unterhalten bereits Sammlungen mit tausenden auf diese Weise mutierten Reis- und Maispflanzen, bei denen einzelne Gene nicht abgelesen werden (der Fachmann spricht von Knock-out-Genen).

Zusammen mit den Sequenzvergleichen zwischen verschiedenen Arten liefern die funktionsgenomischen Untersuchungen den Forschern nun allmählich Hinweise auf die Bedeutung einzelner Gene von Reis. Die Pflanzengenetiker erfahren so, welche und wie viele Erbanlagen die Pflanze zur Entwicklung benötigt, welche davon Stoffwechselaufgaben haben und welche etwa den Ernteertrag direkt mitbestimmen (Kasten links, unten). Zugleich helfen diese Ergebnisse, das genetische Wissen über die anderen Getreidearten zu erweitern.

▶ Die Autoren zeigen hier im Gewächshaus Maispflanzen, bei denen die weiblichen Blütenstände in Tüten aus Wachspapier eingepackt wurden, um ungewollte Befruchtungen zu verhindern. Die männlichen Blütenstände sieht man oben an den Pflanzen.



KAY CHERNUSH

Die Aufgabe einzelner Gene zu kennen ist allerdings in der modernen Pflanzenzucht nur der erste Schritt. Als Nächstes gilt es, Genvarianten (Allele) aufzuspüren, welche die erkannte Funktion je nach Zuchtziel besser, weniger oder auch in anderer Weise erfüllen. Kennt man zum Beispiel eine Erbanlage, die einen bestimmten Vorgang bei der Stärkespeicherung im Maiskorn kontrolliert, ließe sich nach Allelen suchen, die noch bei Dürre arbeiten. Unter Umständen findet man eine günstige Variante bei anderen modernen Maissorten. Größer sind die Aussichten allerdings bei den verwandten Wildgräsern. Dass die domestizierten Gräser diese geringe genetische Vielfalt aufweisen, hängt mit den Zuchtmethoden schon der ersten Bauern zusammen. Nach einer Schätzung dürften zum Beispiel zur Gründerpopulation sämtlicher modernen Maissorten nur etwa zwanzig Pflanzen gehört haben. Diese enge Selektion, gefolgt von jahrtausendelanger Inzucht, hat das genetische Spektrum der Kulturpflanzen im Vergleich zu dem der Wildformen drastisch verringert.

Pionierforschung auf dem Gebiet leisteten Steven Tanksley und Susan McCouch von der Cornell-Universität in Ithaca (New York). Sie suchten bei den wilden Verwandten von Tomaten und Reis nach potenziell nützlichen Genvarianten. Dabei erkannten sie nicht nur das hohe genetische Potenzial der Wildformen, sondern sie entdeckten auch, dass manche der genetischen Anlagen ihren Wert für die Zucht in der Wildpflanze selbst nicht unbedingt offenbaren.

Gen mit verborgener Kraft

Mitte der 1990er Jahre kreuzten Tanksley und McCouch beispielsweise eine peruanische Wildtomate, die ungenießbare kleine grüne Früchte trägt, mit einer modernen Sorte mit eher blassroten Früchten. Die Überraschung: Die neuen Pflanzen produzierten kräftiger rot gefärbte Tomaten. Wie sich herausstellte, veranlasste ein bestimmtes eingekreuztes Gen die stärkere Rötung. Der grünen Tomate fehlen zwar einige Gene für die letzten Schritte zur Synthese des roten Farbstoffs Lycopin, eines Carotinoids. Die Wildpflanze hat jedoch ein sehr leistungsfähiges Allel von einem Gen, das an der Produktion von Lycopin-Vorläufersubstanzen beteiligt ist.

Noch steht die Erforschung der genetischen Vielfalt bei den wilden Verwandten unserer Kulturpflanzen am Anfang. Bei Reis und Tomaten sind schätzungsweise achtzig Prozent der Diversität noch ungenutzt. Wiederholt haben Tanksley, McCouch und andere Forscher aufgezeigt, wie sehr das Einkreuzen von Wildallelen manchmal lohnt. Oft rechnet niemand mit einem derart dramatischen Effekt, etwa weil die Wildpflanze das betreffende Merkmal so gar nicht aufweist – wie bei den grün fruchtenden Wildtomaten. In den meisten Fällen hätten die Agronomen die wertvollen Genvarianten mit traditionellen Zuchtverfahren wohl niemals gefunden. Erst die markergestützte Zucht – Techniken, um Gene und Genorte mit molekularen Markern zu bestimmen – erlaubt den gezielten Zugriff auf diesen Reichtum.

Das nächste Ziel wäre, ganze Gruppen vorteilhafter Genvarianten aus verschiedenen Wildgräsern oder Kultursorten in moderne Zuchtlinien – also Elitesorten oder Elitekultivare – einzubringen. Einerseits könnte man die Pflanzengenome mit Hilfe der Gentechnik verändern, indem man die gewünschten Gene direkt einschleust. Ähnliches geschieht zu anderen Zwecken ja schon bei der Zucht transgener Pflanzen. Andererseits versuchen die Pflanzenzüchter daneben auch, diese langwierige, teure Vorgehensweise zu umgehen, indem sie geeignete Pflanzen in konventioneller Weise kreuzen, dazu aber genetische Marker benutzen, die einzelne Genvarianten anzeigen. Man nimmt von den jungen Pflanzen praktisch einen genetischen Fingerabdruck.

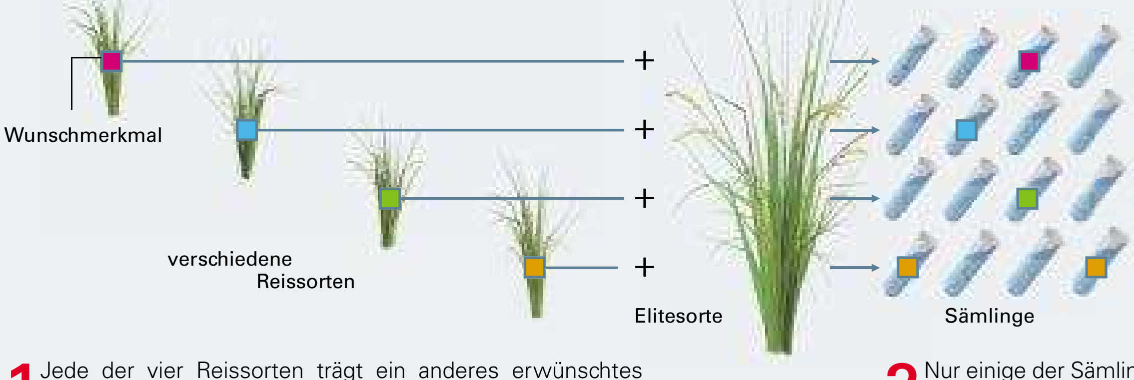
Mit den neuen Verfahren hoffen die Züchter durch wiederholte Kreuzung und Rückkreuzung verbesserte Sorten regelrecht zu kreieren. Diese »designten« Pflanzen würden schließlich die besten Eigenschaften einer Elitesorte mit den Wunschvarianten aus anderen Linien oder von Wildformen verbinden (siehe Kasten S. 90). Bei Pflanzenzucht von modernem Format fallen stets Zehntausende von Sämlingen an, die nur zum Teil die angezielten Merkmale aufweisen. Das muss man heute erfreulicherweise nicht mehr langwierig prüfen, indem man jede einzelne Pflanze aufzieht und zur Samenreife bringt, sondern man bestimmt schon beim Sämling die Gene mittels Markern.

Zeitersparnis dank markergestützter Selektion

Nur Jungpflanzen, die das einzukreuzende Allel aufweisen, werden gezogen und erneut mit dem Elitekultivar gekreuzt. Dies wird so lange wiederholt, bis man eine Population erhält, die in fast allem der Ausgangshochleistungssorte ähnelt, bei der aber zusätzlich jede einzelne Pflanze auch das neue Allel aus der Wildform trägt. Im Vergleich zu herkömmlichen Zuchtmethoden bedeutet das eine Zeitersparnis von Jahren. So können Züchter rascher auf veränderte Umweltbedingungen reagieren, zum Beispiel auf neue oder resistent gewordene Schädlinge. Man könnte auch leichter als bisher Getreidesorten konstruieren, die sich be- ▷

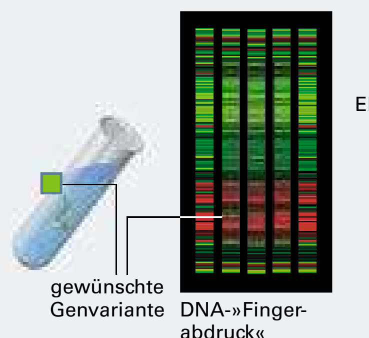
Schnelle Zucht neuer Sorten dank Markern

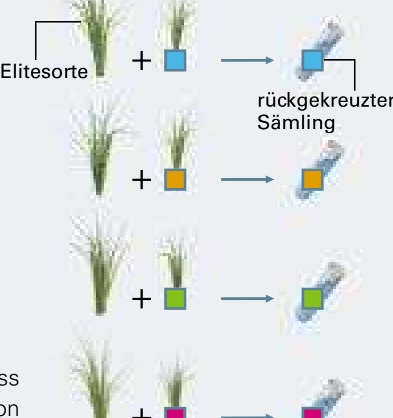
Kennt man ein Gen, das ein wichtiges Merkmal beeinflusst – wie etwa die Korngröße –, kann man in verschiedenen domestizierten Sorten und verwandten Wildgräsern nach günstigen Varianten (Allelen) davon suchen. Diese kreuzt man dann konventionell ein. Statt auf die Ausbildung des Merkmals bei den neuen Pflanzen warten zu müssen, durchmustert man mit Hilfe genetischer Marker schon die Jungpflanzen daraufhin, ob sie die Genvariante tragen.

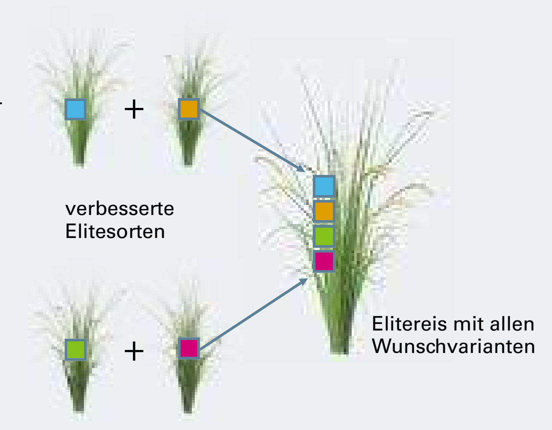


1 Jede der vier Reissorten trägt ein anderes erwünschtes Merkmal (farbige Quadrate). Die Kreuzung mit einem Elitereis ergibt jeweils zehntausende Sämlinge.

2 Nur einige der Sämlinge erben jeweils die bessere Genvariante.







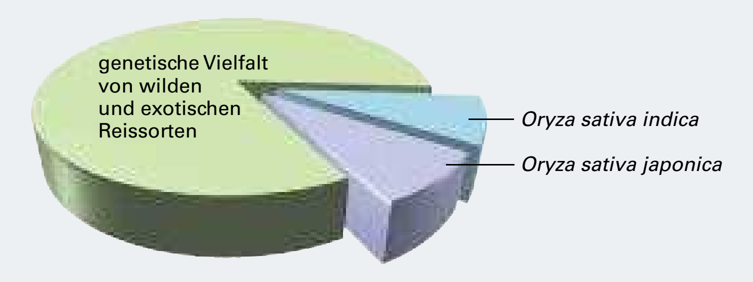
3 Mit den neuen Verfahren muss man nicht mehr Tausende von Pflanzen bis zur Reife kultivieren, um zu prüfen, ob ein Wunschmerkmal eingekreuzt wurde. Denn die Genvariante lässt sich schon wenige Tage nach dem Keimen erkennen.

4 Nur Sämlinge mit der gewünschten Genvariante werden herangezogen und mit dem Elitereis rückgekreuzt.

5 Kreuzung und Rückkreuzung erfolgen so oft – jedes Mal mit dem Markertest –, bis eine neue Sorte alle gewünschten Merkmale trägt.

Genetischer Reichtum des Wildreis

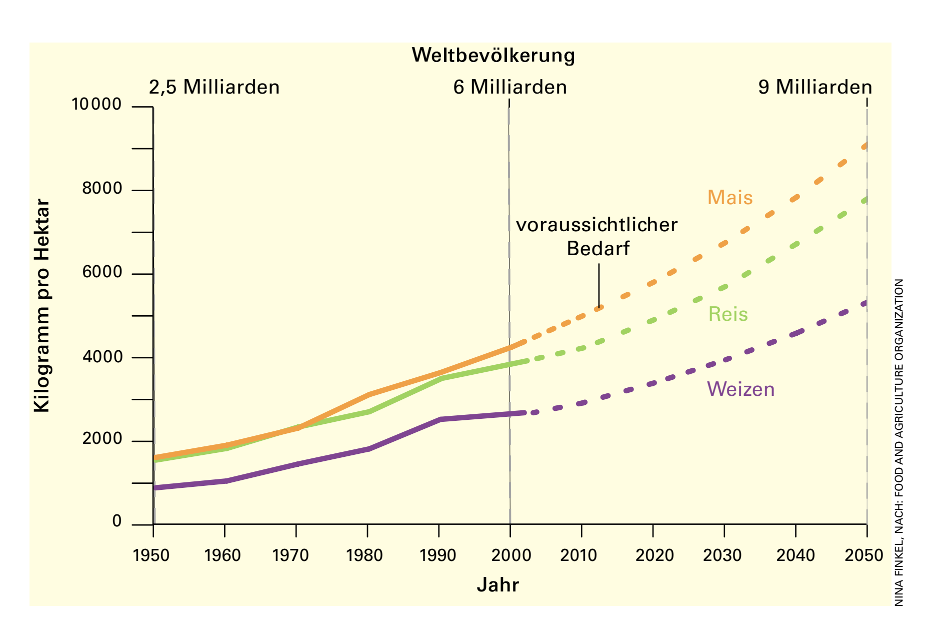
Die über Jahrtausende ingezüchteten Getreide sind genetisch stark verarmt. Bei Wildreis beispielsweise kommen viel mehr Genvarianten vor als in den Kultursorten (wie im Tortendiagramm im Verhältnis dargestellt). Das Potenzial der Wildpflanzen ist aber oft nicht äußerlich ersichtlich. Als zum Beispiel Genvarianten aus einem wilden Reis (*Oryza rufipogon*; linkes Foto) in eine chinesische Hochleistungssorte (rechtes Foto) eingekreuzt wurden, stieg der Ertrag um 17 bis 18 Prozent.





Oryza rufipogon Hochleistungssorte

Im Jahr 2000 wurden weltweit fast dreimal so viel Mais, Reis und Weizen geerntet wie 1950. Auch die menschliche Bevölkerung verdreifachte sich im selben Zeitraum. Um die Menschheit in den nächsten Jahrzehnten zu ernähren, müssten die Erträge weiterhin stetig um etwa 1,5 Prozent pro Jahr steigen.



sonders für eine bestimmte Anbauregion eignen. Man würde somit den Bedürfnissen der Landwirtschaft schneller entgegenkommen – wie auch Vorlieben der Verbraucher.

Das eigentlich revolutionäre Potenzial der markergestützten Züchtung liegt jedoch darin, dass die Methode nach Jahrtausenden den Engpass – den Flaschenhals – der Genvielfalt wieder öffnet, den der Mensch einst bei der Domestikation unserer Nutzpflanzen schuf. Das riesige Genreservoir der Wildgräser steht uns umso weiter offen, je mehr wir über die Gene der Getreidearten wie der Gräser überhaupt herausfinden.

Noch eine eindrucksvolle Studie von Susan McCouch und ihrer Arbeitsgruppe sei hier erwähnt. Die Forscher arbeiteten mit *Oryza rufipogon*, einem malaysischen wilden Vorfahren von Reis. Mit Hilfe von genetischen Markern kreuzten sie zweitausend Gene dieser Wildpflanze in eine moderne chinesische Reishybride ein, was etwa fünf Prozent des Reisgenoms entspricht – mit dem Ziel, den bereits hohen Ertrag der Hybride durch neue Genvarianten womöglich noch zu steigern.

Austausch von Genvarianten bald Routine?

Die Wissenschaftler durchmusterten die neuen Pflanzen auf verschiedene ertragssteigernde Kriterien wie Höhe, Länge der Rispe und Korngewicht. Etwa bei der Hälfte der eingekreuzten Genorte fanden sie ertragsfördernde Allele. Manche davon hatten allerdings zugleich unerwünschte Eigenschaften wie die, dass die Reifung länger dauerte. Doch die Forscher stießen auf zwei Genvarianten offenbar ohne solche Nachteile: Das eine Allel steigerte den Ertrag der modernen Sorte um 17, das andere um 18 Prozent. Wie schon bei den Versuchen mit Wildtomaten hatte es vorher keinerlei Anzeichen gegeben, dass die Wildpflanze der modernen Reissorte in dieser Hinsicht überlegen sein könnte – und doch war das der Fall.

Nicht alle Gene, die in der Landwirtschaft nützlich wären, lassen sich in moderne Getreidesorten durch reine Kreuzungszucht einbringen. Manche davon kommen in Pflanzen, mit denen etwa Mais sich kreuzen lässt, nicht vor – zum Beispiel Gene für bestimmte Herbizidtoleranzen oder Schädlingsresistenzen. Solche Erbanlagen kann man mit gentechnischen Verfahren ins Maisgenom einschleusen. Allerdings lässt sich dann nicht vorherbestimmen, wo sich das fremde Gen im Genom der Wirtspflanze einbaut. Und auch das alte, weniger gute Gen bleibt vielfach vorhanden.

Ein regelrechter Genaustausch in einem Schritt gelingt bisher bei Säugerzellen und bei einigen Bakterien. Mittels homologer Rekombination wird das neue Erbmaterial gezielt an der gewünschten Stelle anstelle des alten eingebaut. Dabei findet das neue Gen das alte und kann es im Erfolgsfall ersetzen, weil beide Varianten fast dieselbe genetische Sequenz aufweisen.

Zukünftig könnte ein solcher direkter Austausch von Allelen im Labor auch in der Nutzpflanzenzucht Routine werden. Bei Reis ist er kürzlich in einer Studie gelungen, und nach einem ähnlichen Prinzip erreichten Forscher den Ersatz von Genvarianten bereits auch bei Mais. Wenn sich die Verfahren bewähren, könnte man sogar Eigenschaften von Pflanzen hinzuziehen, die sich mit den Kultursorten nicht kreuzen. Man würde dann nur die betreffenden Chromosomenabschnitte verwenden.

Seit über dreitausend Jahren hat der Mensch keine neuen Getreide mehr domestiziert. Aller Voraussicht nach müssen wir uns auch in Zukunft mit den schon kultivierten Arten bescheiden. Um den Nahrungsbedarf der wachsenden Weltbevölkerung auch in einigen Jahrzehnten zu decken, bleibt uns wohl nichts anderes übrig, als die vorhandenen Kulturpflanzen weiter zu verbessern. Die markergestützte Zucht beschleunigt die Entwicklung ertragreicherer und günstigerer Sorten erheblich. Das neue Handwerkszeug der Agronomen könnte die Pforten zu einer neuen Grünen Revolution öffnen. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE




Stephen A. Goff (oben) und **John M. Salmeron** sind Pflanzengenetiker und arbeiten bei Syngenta Biotechnology, Inc. in Research Triangle Park in North Carolina. Goff war Leiter eines Projekts, das 2002 eine vorläufige Version des Reisgenoms publizierte. Salmeron isolierte vor einigen Jahren bei Tomaten eines der ersten pflanzlichen Krankheitsresistenzgene.

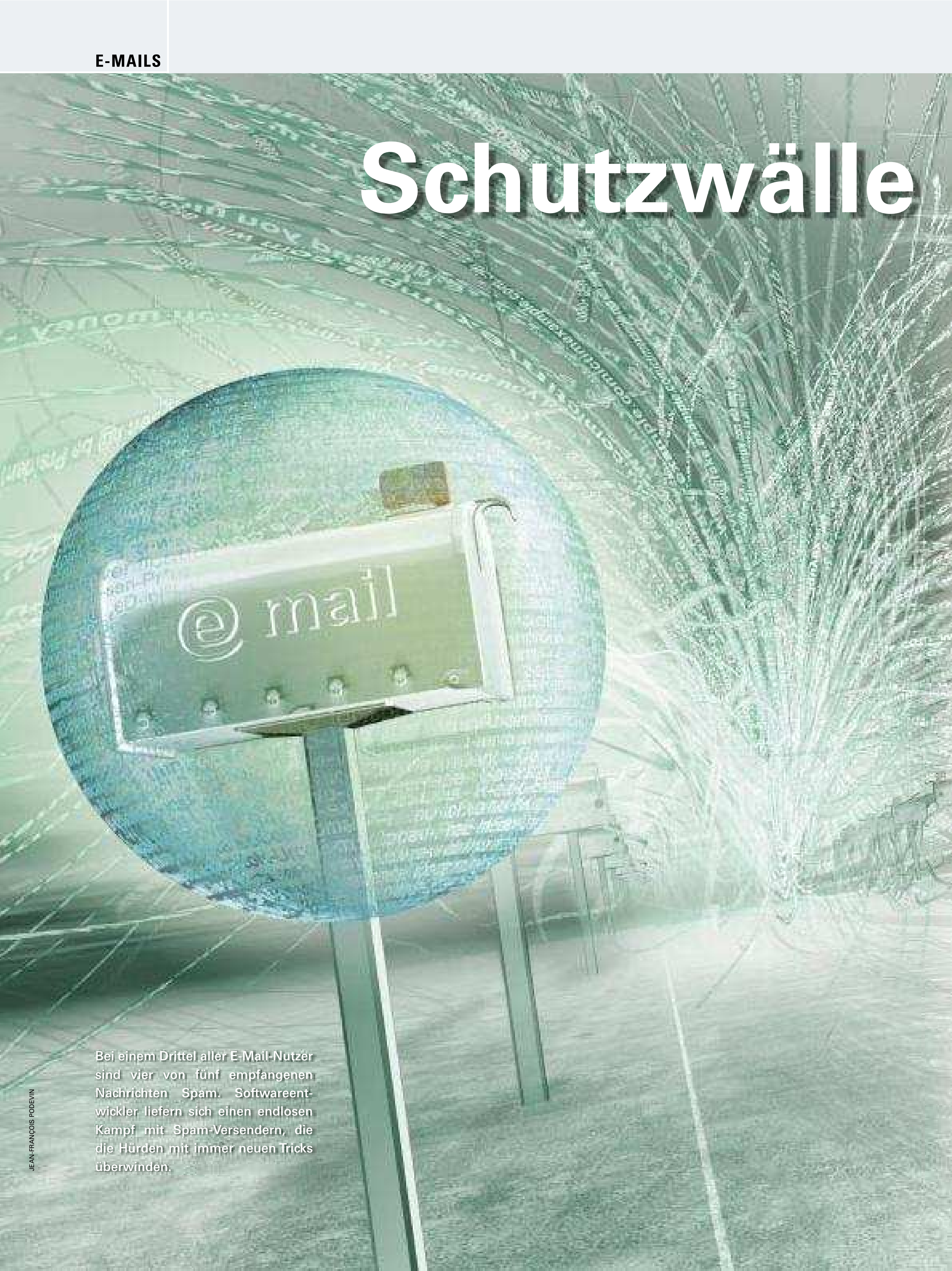
Early allelic selection in maize as revealed by ancient DNA. Von Viviane Jaenicke-Després et al. in: Science, Bd. 302, S. 1206, 14. Nov. 2003

A draft sequence of the rice genome *(Oryza sativa L. ssp. japonica)*. Von Stephen A. Goff et al. in: Science, Bd. 296, S. 92, 5. April 2002

Opening the door to comparative plant biology. Von Jeffrey Bennetzen in: Science, Bd. 296, S. 60, 5. April 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Schutzwälle



Bei einem Drittel aller E-Mail-Nutzer sind vier von fünf empfangenen Nachrichten Spam. Softwareentwickler liefern sich einen endlosen Kampf mit Spam-Versendern, die die Hürden mit immer neuen Tricks überwinden.

JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

gegen Spam

Täglich überfluten Milliarden lästiger Werbe-E-Mails – Spam – das Internet. Sie belasten die weltweite Kommunikation. Wie lässt sich dieses Ärgernis eindämmen?

Von Joshua Goodman, David Heckerman und Robert Rounthwaite

Die erste Spam wurde 1978 an 400 Empfänger im Arpanet geschickt. Absender war ein Mitarbeiter der PR-Abteilung von Digital Equipment Corporation (Dec), der darin für den damals neuen Decsystem-20-Rechner der Firma warb. Heute macht Spam mehr als zwei Drittel der über das Internet versandten E-Mails aus; täglich werden mehrere Milliarden solcher unverlangten Werbebotschaften versandt. Ein Drittel aller E-Mail-Nutzer hat mehr als 80 Prozent Spam in der elektronischen Post. Seit einiger Zeit sorgt Spam zudem durch so genannte Phishing-Attacken für Ärger: Dabei werden gefälschte E-Mails, die Fake-E-Mails, verschickt, die scheinbar von Mitarbeitern großer, Vertrauen erweckender Institutionen stammen, tatsächlich aber von Betrügern kommen – um damit Kreditkartennummern oder andere persönliche Informationen auszuspionieren. Nach einer Studie von Gartner Research von 2004 verursachen Phishing-Attacken in den USA Schäden in Höhe von jährlich 1,2 Milliarden Dollar.

Spammer nutzen nicht nur E-Mail. In Chatrooms warten »Roboter«, die sich als Menschen ausgeben und Leute zu Klicks auf pornografische Webseiten verleiten sollen. Nutzer von Instant-Messaging-Systemen (IM) bekommen es mit so genannten spIMs zu tun, engen »Verwandten« des Spams. In Web-Blogs (Web-Tagebüchern) lauern »Link-Spammer«, welche die Arbeit von Internetsuchmaschinen manipulieren, indem sie unerwünschte Links hinzufügen – was die Nutzung von Webseiten und Links erschwert.

Spam steht teilweise in dem Ruf, die Internetkommunikation zu behindern oder gar zum Erliegen zu bringen. Die Wirklichkeit sieht indes nicht ganz so schwarz aus. Softwareentwickler haben verschiedene Techniken ersonnen, Spam auszufiltern und Spammern das Handwerk zu erschweren – weitere werden in Labors erprobt. Die hier vorgestellten Methoden richten sich gegen Junk-E-Mail, könnten aber auch zur Eindämmung anderer Spamvarianten verwendet werden. Keine dieser Techniken vermag Wunder zu vollbringen, doch ihre Kombination – sofern möglichst viele User sie anwenden – verspricht zumindest deutliche Verbesserungen. Es ist nicht unrealistisch zu hoffen, dass unsere E-Mail-Postfächer eines Tages wieder nahezu frei von Spam sein werden.

Hinterhältige E-Mails

Die ärgerlichste Eigenschaft von Spam ist, dass es sich durch ständige Veränderungen den Versuchen zu seiner Eindämmung widersetzt: Jedes Mal, wenn Softwareentwickler einen Schutz gegen Spam entwickeln, finden Spammer eine Möglichkeit, diesen zu umgehen. Der »Rüstungswettstreit« hat dazu geführt, dass beide Seiten in einer Art Koevolution kontinuierlich Fortschritte machen und sich immer raffiniertere Methoden ausdenken.

Als ein weiteres grundlegendes Problem haben Entwickler und Juristen extreme Schwierigkeiten, Spam zu definieren. Viele Gesetze beschreiben Spam als »unaufgefordert versandte kommerzielle E-Mail eines Absenders, mit dem zuvor keine Geschäftsverbindung bestand«. Doch diese Definition ist zu allgemein. Einmal wurden wir per E-Mail um Genehmigung gefragt, eine unserer im Internet publizierten Kurzgeschichten als Vorlage für einen Kinofilm verwenden zu dürfen. Diese E-Mail erfüllte die gesetzlichen Spamkriterien: Sie wurde unaufgefordert versandt, hatte kommerziellen Inhalt und stammte von einem unbekannten Absender. Dennoch würde sie kaum jemand als Spam bezeichnen.

Eine alternative Definition könnte dem Umstand Rechnung tragen, dass Spam typischerweise massenhaft versandt wird. Wir haben jedoch kürzlich Unterlagen zu einer technischen Konferenz über E-Mail- und Anti-Spam-Systeme per E-Mail angeboten; die Empfänger waren fünfzig Personen, die zu diesem Thema publiziert hatten, die wir aber noch nie persönlich getroffen haben. Keiner von ihnen hat sich beschwert. Die vielleicht beste Definition von Spam ist, dass es unerwünscht und unspezifisch in der Ansprache des Adressaten ist. Spam lässt sich ähnlich schwer definieren wie Pornografie – und doch erkennen wir es sicher, wenn es unsere Mailboxen überflutet.

Wir arbeiten seit 1997 am Spamproblem. Damals schlug einer von uns (Heckerman) auf maschinellem Lernen basierende Methoden als Gegenmittel vor. Seitdem haben wir drei – und viele andere Softwareentwickler in diesem Bereich – mehrere Ansätze zur Spambekämpfung entwickelt und untersucht, darunter Kombinationen aus technischen und rechtlichen Lösungen sowie industrieweite Initiativen.

Zu den ersten Versuchen zählte die so genannte Fingerabdruck-Vergleichs- ▷

technik. Dazu suchen Entwickler zunächst einige Beispiele für Spam heraus und erstellen davon elektronische »Fingerabdrücke«. Diese bestehen aus einer Zahl, die aus dem Inhalt der Nachricht erzeugt wird. Auf diese Weise erhalten gleiche oder ähnliche Nachrichten dieselbe Kennzahl. Man könnte – als einfaches Beispiel – die Anzahl der Buchstaben A in einer Nachricht nehmen, dazu das Zehnfache der Anzahl der Bs addieren und dazu das Hundertfache der Anzahl der Cs und so weiter. Wird eine neue Nachricht empfangen, erzeugt das Anti-Spam-Programm deren Fingerabdruck und vergleicht diesen dann mit dem von bekanntem Spam. Stimmen die Fingerabdrücke überein, löscht oder archiviert das Programm die Nachricht.

Leider jedoch konnten diese simplen Methoden von Spammern leicht umgangen werden. Sie fügten ihren Nachrichten einfach zufällig ausgewählte Buchstaben hinzu (siehe Kasten rechts). Spambekämpfer entwickelten daraufhin noch ausgefeiltere Fingerabdrucktechniken, die versuchten, erkennbare Sequenzen aus Zufallsbuchstaben nicht auszuwerten. Diese Hürde überwanden die Spammer, indem sie stärker normalem Text ähnelnde Buchstaben-Sequenzen einfügten – etwa frei erfundene Wetterberichte. Am Ende erwies es sich als ziemlich schwierig, Zufallssequenzen für die Fingerabdrucksysteme hinreichend genau erkennbar zu machen.

Intelligente Filter

Statt Fingerabdrücke zu vergleichen, nutzte eine andere Gruppe die Möglichkeiten des maschinellen Lernens: Spezielle Computerprogramme können lernen, Spam von regulären E-Mails zu unterscheiden. Sie lassen sich nicht so leicht durch einige zusätzliche Zufallsbuchstaben oder -worte verwirren.

Wir probierten zunächst die einfachste und verbreitetste Methode des maschinellen Lernens aus: Der Naive-Bayes-Algorithmus analysiert die Wahrscheinlichkeit, mit der bestimmte Wörter im Text auftreten. Die Wörter »klicken«, »hier« und »abbestellen« etwa treten in Spams mit 90-prozentiger Wahrscheinlichkeit auf, in gewöhnlichen E-Mails hingegen nur mit 20 Prozent (100 Prozent bedeutet sicheres Vorkommen). Wenn man die Wahrscheinlichkeiten aller Wörter einer Nachricht miteinander multipliziert und ein statistisches Verfahren, die so genannte Bayes-Regel, anwendet, erhält man eine Richtgröße, anhand derer sich abschätzen lässt, ob es sich um Spam handelt.

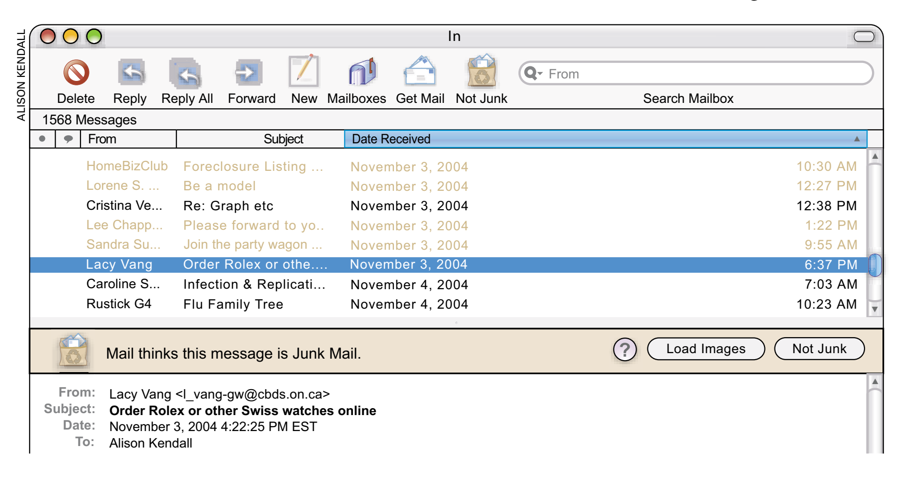
Die Naive-Bayes-Strategie kann sehr gut gewöhnliche E-Mail identifizieren und fällt, wie alle diese Lernmethoden, auf einfache Täuschungen nicht herein. Dennoch waren wir uns immer ihrer Unzulänglichkeiten bewusst. Ihre Grundannahme, dass Wörter in E-Mails voneinander unabhängig und ohne Bezug zueinander sind, ist in vielen Fällen falsch (so treten zum Beispiel »klicken« und »hier« oft gemeinsam auf), was die Ergebnisse beeinträchtigt.

Wegen dieser Probleme haben wir unsere Forschung auf so genannte unterscheidende lineare Modelle ausgerichtet. Sie berechnen für jedes Wort in einer Nachricht Gewichtungen und ebenso für andere Charakteristika – beispielsweise ob eine Nachricht an viele Empfänger versandt worden ist. Diese Modelle können in gewisser Weise die Beziehungen zwischen Wörtern erlernen: etwa, weniger Gewicht auf Wörter wie »klicken«, »hier« oder »abbestellen« zu legen, da diese oft gemeinsam auftauchen.

Genauer betrachtet arbeiten sie so: Nehmen wir an, ein Naive-Bayes-Modell sieht diese drei Wörter, die oft mit Spam in Verbindung gebracht werden. Es könnte sich entscheiden, dies seien hinreichende Gründe, um jede Nachricht, die diese drei Wörter enthält, als »Junk« zu klassifizieren – was gelegentlich dazu führt, dass normale E-Mails gelöscht werden.

Im Gegensatz dazu wissen die unterscheidenden linearen Modelle, dass diese Wörter häufig zusammen auftreten; sie würden ihnen eine geringere und daher passendere Gewichtung zuweisen. Ein solches System könnte sogar lernen, Wörtern wie »hier«, die in Spam häufiger vorkommen können, gar keine Gewichtung zu geben, da sie kein brauchbares Unterscheidungskriterium darstellen. Weiterhin können unterscheidende Modelle herausfinden, dass sich bestimmte Wörter wechselseitig auslöschen. Obwohl etwa das Wort »nass« häufig in Spam vorkommt, könnte es sich dennoch um gewöhnliche E-Mail

Überwachungssoftware erkennt eintreffende Spams durch Vergleich mit früheren, vom Empfänger akzeptierten oder abgelehnten E-Mails.



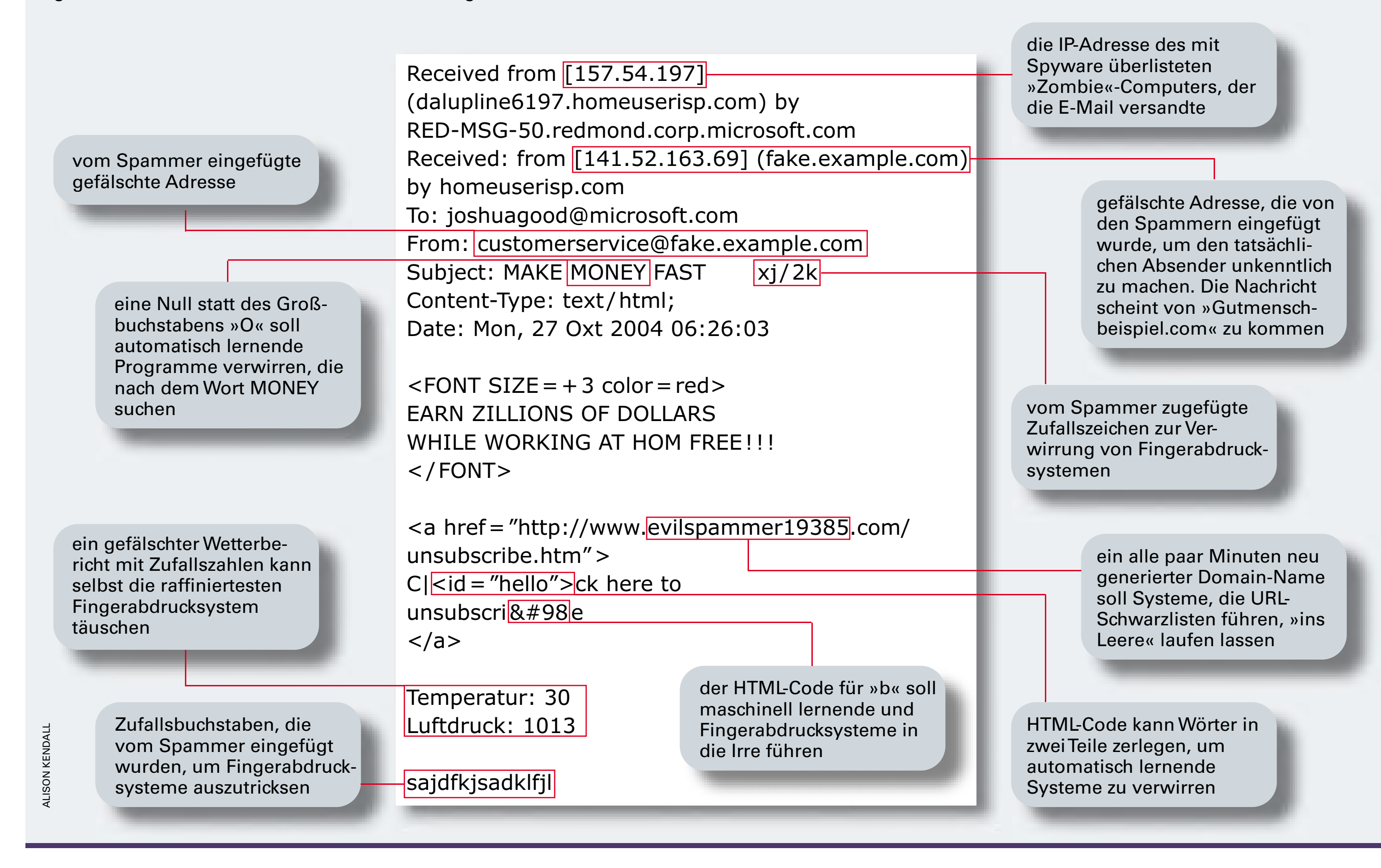
IN KÜRZE

▶ Die **wachsende Flut unerwünschter E-Mails** – Spam – behindert zunehmend die Internetkommunikation. Softwareentwickler liefern sich mit den Spamversendern (»Spammern«) eine erbitterte virtuelle Schlacht: Ständig neue Bedrohungen erfordern immer raffiniertere Gegenmaßnahmen.

▶ Eine **Kombination aus herkömmlichen und neuen Anti-Spam-Maßnahmen** – darunter intelligente Softwarefilter, Systeme zur Identitätsprüfung von E-Mail-Versendern sowie wirksame Anti-Spam-Gesetze – könnte helfen, die Spamflut einzudämmen; doch nur, wenn diese Maßnahmen umfassend und konsequent eingesetzt werden.

Die Tricks der Spammer

Um Anti-Spam-Filter zu umgehen, bedienen sich Spammer unterschiedlicher Methoden. Eine der einfachsten Anti-Spam-Maßnahmen ist der »Fingerabdruck«-Vergleich: Dazu analysieren Computer bekannte Spam-Nachrichten mit statistischen Verfahren und halten neue Nachrichten, die diesen ähneln, zurück. Doch die Spammer lernten schnell, solche Fingerabdruckssysteme auszutricksen: Sie bauten in ihre Texte Folgen zufällig ausgewählter Buchstaben ein – oder künstlich generierte Inhalte ähnlich Wetterberichten, die statistisch nicht als Spam eingestuft werden. Später begannen sie, die Schreibweise von Wörtern, die Hinweise auf Spam geben, gezielt zu verändern (etwa M0NEY statt MONEY – mit einer Null anstelle des O – oder VIA GRA statt VIAGRA). Einige Filter untersuchen auch, ob in Nachrichten enthaltene Links auf bekannte Spam-Webseiten verweisen. Im Gegenzug nutzen Spammer gefälschte Web-Adressen, die von den Filtern nicht erkannt werden.



handeln, wenn es in Verbindung mit »Wetter« auftaucht.

Ein Vorteil der Naive-Bayes-Systeme besteht darin, dass sie sich leicht trainieren lassen. Die Bestimmung geeigneter Gewichtungen in den unterscheidenden linearen Modellen ist dagegen weitaus schwieriger. Dazu müssen Programmierer den Wörtern und anderen Textcharakteristika testweise eine Vielzahl unterschiedlich hoher Gewichtungen zuweisen, bis das System die Aufgabe, Spam und Nichtspam zu unterscheiden, optimal löst. Zum Glück haben Forscher auf diesem Gebiet beachtliche Fortschritte erzielt. Verfahren wie die so genannte »sequenzielle minimale Optimierung«, entwickelt vom Microsoft-Programmierer John Platt, oder das SCGIS *(Sequential-Conditional-Generalized-Iterative-Scaling)*, das einer von uns (Goodman) entwickelt hat, sind zehn- bis hundertmal schneller als ältere Techniken. Wenn große Mengen an Spamtrainingsdaten aufgearbeitet werden müssen – etwa über eine Million Nachrichten und Hunderttausende von Gewichtungen –, sind schnellere Verfahren unerlässlich.

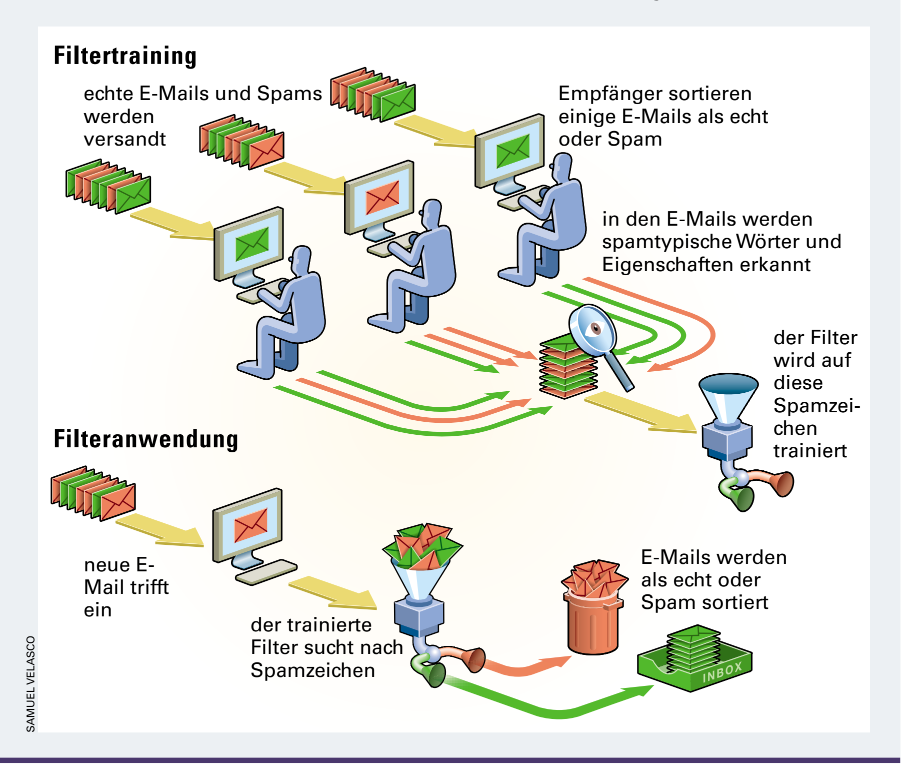
Beide Systeme gewinnen dadurch an Tempo, dass sie sequenziell vorgehen. Beim SCGIS-Algorithmus bezieht sich der Namensteil »sequenziell« auf einen Prozess, bei dem die jedem einzelnen Wort zugeordneten Gewichtungen nacheinander optimiert werden. Dies steigert im Lauf der Zeit die Gesamtleistung. Ganz anders arbeiten Verfahren, die alle Gewichtungen simultan zu optimieren versuchen. Wenn die Gewichtungen für Hunderttausende von Wörtern festgelegt werden sollen, ist es normalerweise effektiver, in kleinen Schritten vorzugehen.

Versteckspiele mit Spam

Wir hatten schon immer gewusst, dass unsere maschinellen Lernsysteme von Spammern ausgetrickst werden können, wenn sie den Wortlaut in ihren Nachrichten verbergen. Gewiefte Spammer lernten etwa, in Wörtern wie M0NEY das O durch eine Null zu ersetzen. Oder sie nutzten Tricks der Internetsprache HTML *(hypertext markup language)* wie den, Wörter in mehrere Teile zu zerlegen ▷

Wie E-Mail-Benutzer ihre Spam-Filter trainieren

Intelligente Spamfilter nutzen Methoden des maschinellen Lernens, um Spam von gewöhnlichen E-Mails zu unterscheiden. Die einfachste und am häufigsten verwandte Methode ist der Naive-Bayes-Algorithmus. Er untersucht zunächst die Spamwahrscheinlichkeit für jedes einzelne Wort im Text (so tritt das Wort »klicken« mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,9 in Spam auf, aber nur mit einer von 0,2 in regulärer E-Mail). Multipliziert man die Wahrscheinlichkeiten aller Wörter und wendet darauf das Bayes-Verfahren an, so lässt sich die Wahrscheinlichkeit abschätzen, ob es sich bei der Nachricht um Spam handelt. Unter Spamverdacht stehende Nachrichten werden abgeblockt.



SAMUEL VELASCO

(»kl« und »icken« statt »klicken«). Weil nun die entlarvenden Wörter (Money, klicken) nicht mehr in der Nachricht auftauchen, reagieren die Filter nicht. Zum Glück können maschinelle Lernsysteme diese Tricks aber auch erkennen und sich ihnen anpassen.

Bei einer anderen Spamattacke hatten wir fälschlicherweise angenommen, dass nur wenige Leute auf diese Nachricht – sie hatte das Ziel, einen Spamfilter zu täuschen – antworten. Wir dachten: Wer würde schon solch ein Produkt kaufen? Leider lagen wir falsch: Käufer von Schwarzmarktartikeln oder illegalen Produkten gehen nicht davon aus, dass sich die Verkäufer anspruchsvoller Vermarktungsmethoden bedienen. Wir mussten daher unsere Lernsysteme auf eine von Forschern als »N-Gram« bezeichnete Methode umstellen. Diese Technik nutzt Untereinheiten (Subsequenzen) von Wörtern, um für Spam typische Schlüsselwörter aufzuspüren. Bei einer E-Mail mit der Zeichenfolge »n@ckte D@men« würden die daraus generierten N-Grams unter anderem lauten: »<Leerzeichen>n@c«, »n@ck«, »@ckt« und so fort. Da diese Wortfragmente in typischen Spams auftauchen, liefern sie aufschlussreiche Hinweise.

N-Gram-Techniken haben auch die Wirksamkeit unserer Filter bei fremdsprachigen E-Mails verbessert. Japaner und Chinesen etwa nutzen keine Leerzeichen, um Wörter zu trennen; es ist daher sehr schwierig, exakte Wortgrenzen zu finden. Bei diesen Sprachen untersuchen N-Gram-Systeme einfach jedes mögliche Wort und Wortfragment.

Manchmal verstecken Spammer ihre Nachricht in einem Bild. Abgesehen von Auswertungen von Links in der Nachricht oder dem Renommee des Versenders können maschinelle Lernsysteme dessen Inhalt nicht analysieren. Ein viel versprechendes Gebiet für künftige Spamfilter bietet daher die optische Zeichenerkennung (OCR). Mit den gleichen OCR-Techniken, mit denen Bilddokumente ausgewertet werden, ließe sich dann auch Text erkennen, der in einem Bild versteckt ist; das Ergebnis würde dann an den Filter des maschinellen Lernsystems weitergeleitet.

Besonders lästig sind Spams mit pornografischen Bildern. Zum Glück haben Computerforscher in letzter Zeit große Fortschritte beim automatischen Aufspüren solcher Bildinhalte gemacht. Auf diesem Gebiet wird viel geforscht, geht es doch auch darum, Kinder vor dem Besuch dieser Webseiten zu schützen. Auch sollen Verbreiter von Pornografie daran gehindert werden, gratis verfügbare Websysteme zu nutzen. Doch die Bildanalyse ist noch immer zeitaufwändig und die Bildauswertung muss zuverlässiger werden. So können an sich harmlose Fotos mit nackter Haut, etwa von Babys oder Frauen im Bikini, falsche Spamwarnungen auslösen.

Gefälschte Quellen

Unser Team arbeitet zur Identifizierung von Spam auch daran, so genannte URL-Informationen *(uniform resource locator)* auszuwerten – jenen Code, der zu anderen Webseiten verlinkt. 95 Prozent aller Spams enthalten eine URL. Die meisten Spammer wollen Internetsurfer auf ihre Webseiten locken (nur ein kleiner Teil bevorzugt Kontakt über Telefon). Daher eignen sich URL-Informationen besonders gut zum Filtern.

Filter können die URL-Information auf unterschiedliche Weise auswerten. Einige Webdienste haben bereits damit begonnen, Spam abzublocken, der von einschlägig bekannten Seiten im Internet stammt. Links zu bislang unbekannten Domains (Teil jeder Webadresse, etwa .de, .org, .net oder .com) können als verdächtig betrachtet werden; Spammer können sehr schnell neue Domains erzeugen, während die meisten unverdächtigen Domains bereits länger bestehen. Doch auch gewöhnliche E-Mail kann URL-Information enthalten: Eine Nachricht, die nur auf nicht spamverdächtige Seiten verweist, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit kein Spam.

Selbst wenn Filtertechniken sehr gut arbeiten, probieren Spammer für ihre

Attacken – wie die Erfahrung zeigt – immer wieder neue Tricks aus. Wir versuchen nicht, diesen endlosen Wettstreit zu gewinnen. Der auf lange Sicht erfolgversprechendste Weg scheint uns zu sein, die Spielregeln zu ändern. Wir studieren daher Prüfsysteme, die darauf abzielen, mehr über einen Spammer zu erfahren.

Das allererste Spam wurde versandt, indem alle 400 E-Mail-Adressen der Empfänger von Hand eingetippt wurden. Heute werden nahezu alle Spams automatisch verbreitet. Wenn ein Absender beweisen kann, dass er ein menschliches Wesen ist, ist er vermutlich kein Spammer. Eines der ersten auf dieser Idee basierenden Verifikationssysteme schlug Moni Naor vom Weizmann-Institut für Wissenschaft in Israel vor. Es wurde unter mehreren Abkürzungen bekannt: Hip (*human interactive proof*, menschlich-interaktiver Beweis); Captchas steht für *completely automated public Turing test to tell computers and humans apart* (komplett automatisierter Turing-Test zur Unterscheidung von Computern und Menschen) und wird auch umgekehrter Turing-Test genannt. Hip verwendet Probleme oder Rätsel, die für Menschen leicht zu lösen sind, ▷

Mehrgleisige Strategien gegen Spam

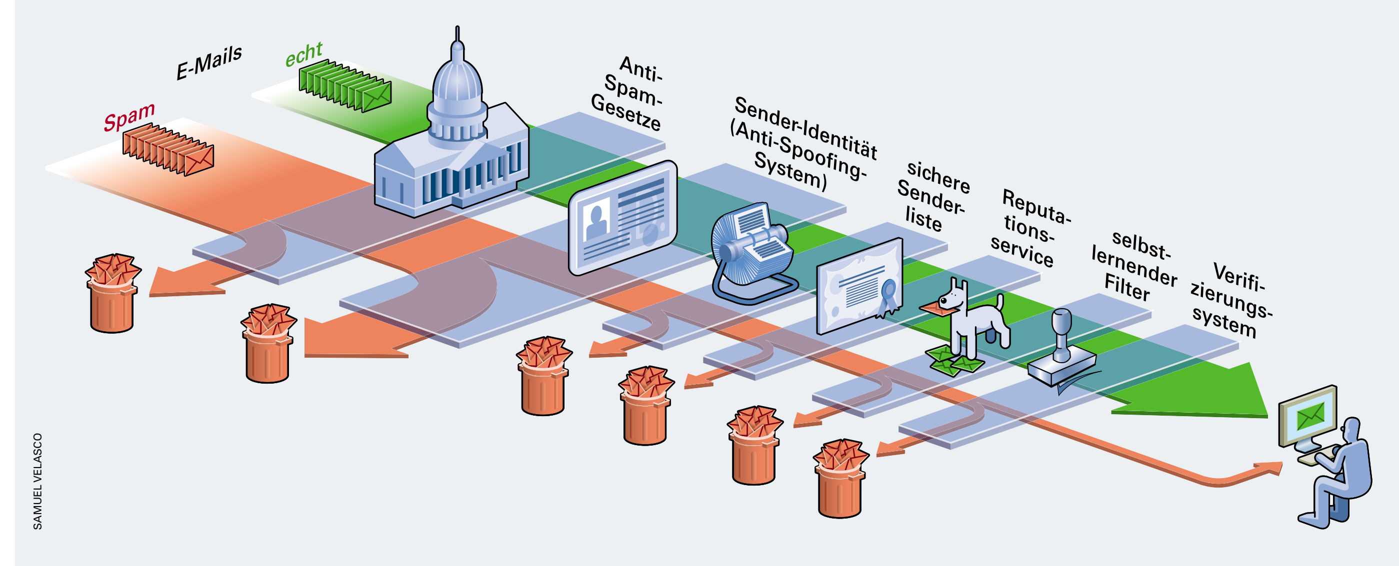
Ein wirksames Eindämmen von Spam benötigt mehrgleisige Strategien. Viel versprechend ist eine Kombination aus intelligenter E-Mail-Filtertechnik und Verifikationssystemen, die nachweisen können, dass der Absender eine Person ist. Ebenso wirksam könnte es sein, den Versand von Spam so teuer machen, dass er sich für Spammer nicht mehr lohnt.

Ein solches System könnte folgendermaßen funktionieren: Bevor ein E-Mail-System eine Nachricht ausliefert, prüft es zunächst, ob der Absender auf einer »weißen/sicheren Liste« von als vertrauenswürdig eingestuften Versendern steht. Ist dies der Fall, wird die Nachricht zugestellt. Falls nicht, wird die Nachricht an einen maschinell lernenden Spamfilter weitergeleitet, der sehr aggressiv vorgeht: Wenn die Nachricht nur ansatzweise verdächtig ist, wird der Absender einem Verifikationstest unterzogen.

Solch ein Verifikationssystem sendet (zumeist) eine Anfrage an den ursprünglichen Absender zurück, in der dieser dazu aufgefordert wird, ein Hip-Problem *(human interactive proof)* zu lösen. Dabei handelt es sich um eine Aufgabe, die Menschen leicht enträtseln können, Computer hingegen nicht. Löst der Absender das Hip-Problem, geht seine Antwort an das Empfangssystem zurück, dessen E-Mail-Software die Nachricht nun an die Mailbox des Empfängers schickt. Ein anderes Verifikationssystem nutzt ein Computerrätsel, dessen Lösung für Computer aufwändig ist, aber für Menschen nicht. Dieses Rätsel wird dem Absender-Computer übermittelt. Hat er es zufrieden stellend gelöst, wird die Nachricht dem Empfänger zugestellt. Spammer müssten, um die Lösung zu finden, für jede einzelne Nachricht sehr viel Computerzeit aufbringen, was den finanziellen Rahmen sprengen würde. Ein drittes Verifikationssystem arbeitet mit Bezahlung. Die Empfänger könnten eine Minizahlung (beispielsweise einen Cent) von jedem unbekannten E-Mail-Versender verlangen. Wenn die Nachricht sich nicht als Spam erweist, ignoriert der Empfänger den »Scheck«. Auf diese Weise bleibt der Nachrichtenversand für reguläre Absender kostenlos, würde für Spammer aber rund 100-mal teurer.

Rund die Hälfte aller Spams nutzt gefälschte Absender-Adressen. Der neue Industriestandard »Sender-ID« löst dieses Problem endlich. Dabei werden dem Domain-Namen-System (DNS) weitere Informationen hinzugefügt: eine Liste mit den IP-Adressen (IP: Internet-Protokoll) derjenigen Computer, die berechtigt sind, E-Mails von dieser Domain aus zu versenden. Gibt ein Spammer vor, E-Mail von einer bestimmten Domain aus zu versenden, würde seine IP-Adresse mit keinem der Einträge in der Sender-ID-Liste übereinstimmen. Auf diese Weise könnte das E-Mail-Programm erkennen, dass die Nachricht gefälscht ist.

Eine ergänzende Maßnahme zur Spambekämpfung sind nationale Gesetze. Das amerikanische Can-Spam-Gesetz von 2004 verbietet einige besonders umstrittene Praktiken wie das Verwenden falscher »Von:«-Angaben. Doch die bisherigen Gesetze erwiesen sich als nicht sehr wirksam.



SAMUEL VELASCO





LINKS: CORBIS / DAN GURAVICH; RECHTS: JOSHUA GOODMAN

Automatische Anti-Pornografie-Systeme, die sexuell anstößige Bilder ausfiltern sollen, weisen zu oft harmlose Bilder als Sexspam ab – wie die beiden hier gezeigten.

für Computer aber möglichst schwierig sein sollen. So fällt es nur Menschen sehr viel leichter als Computern, in einem Bild willkürliche Buchstabenfolgen zu erkennen, die darin verzerrt oder teilweise verdeckt dargestellt sind.

Hip ist Teil eines Frage-Antwort-Systems, das heraufinden soll, ob der Absender ein Mensch ist. Bevor eine im E-Mail-System eingetroffene Nachricht weitergeleitet wird, prüft das System eine »sichere Liste« von Absendern, die als vertrauenswürdig gelten. Steht der Absender auf dieser Liste, wird die Nachricht an die Mailbox des Empfängers weitergeleitet. Falls nicht, geht an den Absender eine E-Mail, in der er um Lösung eines Hip-Problems gebeten wird. Löst er dies zufrieden stellend, wird die ursprüngliche E-Mail an den Empfänger ausgeliefert.

Doch ein solches interaktives System kann für die Benutzer lästig sein. Nur wenige wollen Hip-Fragen beantworten, um E-Mail versenden zu können, und manche weigern sich sogar. Ein Alternativvorschlag stammt von Moni Naor und seiner Kollegin Cynthia Dwork: Sie benutzen Rechenrätsel. Um eine Nachricht ausliefern zu können, muss das E-Mail-System des Absenders zunächst eine vom Empfängersystem erzeugte Rechenaufgabe lösen. Dahinter steht die Idee, nachzuweisen, dass der Absender mehr Computerzeit für jede einzelne Nachricht aufwendet, als es sich ein Spammer leisten könnte, der massenweise E-Mails verschicken will. Die Rechenrätsel ähneln einem Puzzlespiel für Kinder – sie sind schwer zu lösen, aber einfach zu verifizieren. Im Schnitt erfordert ihre Lösung mehrere Sekunden oder gar Minuten. Um die Probleme schnell genug lösen zu können, müssten Spammer viele Computer kaufen, was zu unverhältnismäßig hohen Kosten führen würde.

Ein anderes Beweissystem setzt auf Bezahlung. Die Absender verschicken gemeinsam mit ihrer Nachricht eine Art elektronischen Scheck über einen kleinen Betrag, beispielsweise einen Cent. Dank des Schecks darf die Nachricht die Spamfilter passieren. Handelt es sich bei der Nachricht nicht um Spam, ignoriert der Empfänger den Scheck. Anderenfalls kann er sich über ein standardisiertes Inkassosystem den Betrag gutschreiben lassen (oder ihn an eine gemeinnützige Organisation spenden). Weiterhin gibt es Software, welche die Zahl der maximal versendbaren E-Mails pro Anwender begrenzt, sodass diesem nur ein bestimmtes »Budget« zur Verfügung steht.

Der »all inclusive«-Angriff

Für gewöhnliche Anwender ist der Mail-Versand kostenlos, Spammer werden mit Beträgen von einem Cent pro Mail – dem Hundertfachen der Kosten eines Spam für den Absender – zur Kasse gebeten, was für die meisten zu kostspielig wird. Für normale Anwender hinterlegt der Internetprovider zusätzlich eine kleine virtuelle Summe, die auch beim Kauf der E-Mail-Software gezahlt werden könnte, sodass für die meisten Anwender keine Kosten entstehen.

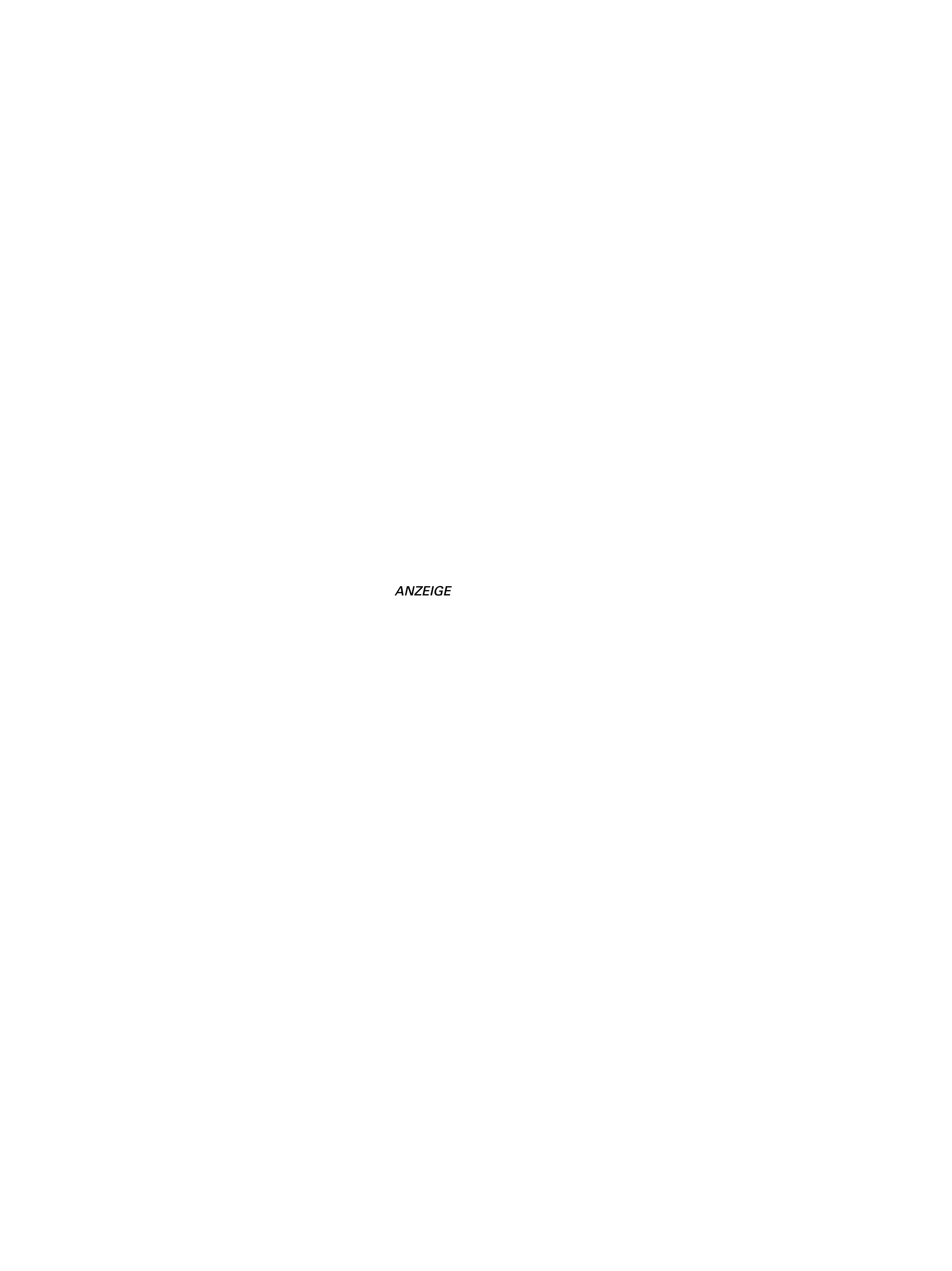
Obwohl solche elektronischen Bezahlsysteme vom Konzept her einfach erscheinen, ist ihre praktische Umsetzung schwierig. Denn sie erfordern technischen und organisatorischen Aufwand, um die Transaktionen kostenpflichtig zu machen. Viele Fragen zur Infrastruktur einer solchen Bank für Minibeträge bleiben unbeantwortet: Wo kommt das für die Zahlungen verwendete Geld her? Wie wird die Bank unterhalten, und wem kommt der Gewinn zu Gute? Wer erhält die Zahlungen? Wie kann das System vor Betrügern geschützt werden? Obwohl keines dieser Probleme unlösbar ist, dürfte es schwierig sein, alle gemeinsam in den Griff zu bekommen.

Unsere bevorzugte Strategie gegen Spam ist eine Kombination aus E-Mail-Filterung und einem Verifikationstest – etwa Hip, einem Rechenrätsel oder einer Minizahlung. Bei diesem Ansatz würde die Nachricht eines Absenders, der nicht auf der »sicheren Liste« des Empfängers steht, an ein maschinell lernendes Spamfilter weitergeleitet, das besonders aggressiv vorgeht. Schon wenn die Nachricht nur leicht verdächtig erscheint, erhält der Absender eine Kontrollfrage. (Die meisten E-Mails zwischen echten Personen würden nicht darunterfallen, was die Zahl der Prüfanfragen drastisch reduziert.)

Der Absender wird dann vor die Wahl gestellt: Entweder er löst das Hip beziehungsweise ein Computerrätsel oder er leistet eine rückerstattbare Minizahlung. Wenn der Computer des Absenders über neuere Software verfügt, wird diese das Rätsel automatisch lösen – für den Absender praktisch unbemerkt.

Doch die Erfolge, die einzelne Firmen oder Institutionen bei der Spambekämpfung erzielen, sind immer begrenzt, egal wie groß sie sind. Eine allumfassende Lösung würde die Zusammenarbeit der gesamten Computer- und Softwareindustrie sowie der nationalen Regierungen erfordern.

Rund die Hälfte der heute versandten E-Mails verwendet gefälschte (»gespoofte«) Absender. Die derzeit gebräuchlichen E-Mail-Protokolle basieren


ANZEIGE

▷ auf Vertrauen: Die Absender geben einfach an, wer sie sind, und die Empfänger glauben ihnen. Dieser Ansatz funktionierte in der Anfangszeit des Internets hervorragend – als es Spam noch nicht gab.

Veränderungen von Internet-Protokollen haben sich bislang als schwierig erwiesen, und dies gilt insbesondere für E-Mail-Protokolle. Doch ein neuer Industriestandard namens Sender-ID nimmt das Spoofing-Problem nun endlich in Angriff. Es fügt dem Domain-Namen-System (DNS) weitere Informationen hinzu. Dabei werden die IP-Adressen aufgelistet, von denen E-Mails, die von einer bestimmten Domain versandt werden, kommen dürfen. IP-Adressen sind numerisch (etwa 1.2.3.4) – vergleichbar dem Straßennamen einer Firma.

Eine spamfreie Zukunft

Die neue DNS-Liste mit Einträgen einer bestimmten Domain – etwa beispiel.com – informiert darüber, welche IP-Adressen Erlaubnis haben, von dieser Domain aus E-Mails zu versenden. Wenn nun ein Spammer vorgibt, beispiel.com zu sein, stimmt seine IP-Adresse nicht mit den IP-Adressen überein, die in der Absender-ID-Liste von beispiel.com aufgeführt sind. Ein E-Mail-Programm würde auf diese Weise erfahren, dass die E-Mail Spam ist.

Zwar stellt die Kenntnis der Absenderidentität einen wichtigen Beitrag zum Schutz vor Betrug (wie E-Mail-Phishing) dar. Doch das Spamproblem wird dadurch nicht gelöst. Denn nichts hindert Spammer daran, sich tagtäglich – oder sogar alle paar Minuten – eine neue Identität zuzulegen. Deshalb werden so genannte Reputationsdienste immer wichtiger – bei denen sich Versender als Nichtspammer zertifizieren lassen können. Bei dem »Bonded Sender Program« der Firma IronPort hinterlegen die Versender als Sicherheit sogar Geld. Wenn die Reklamationsquote für den Sender ein bestimmtes Maß überschreitet, wird die hinterlegte Summe an eine zuvor festgelegte gemeinnützige Organisation ausgezahlt. Spamfilter können die »Bonded Sender«-Liste gegenchecken und E-Mails mit darin gefundenen Absendern passieren lassen – selbst dann, wenn sie verdächtig erscheinen. Solche Dienste würden sich sogar für diejenigen lohnen, die nur wenig E-Mails verschicken. Internet-Service-Provider (ISP) wie MSN oder AOL könnten mit einem Reputationsdienst zusammenarbeiten und an dessen Zertifizierungsprogramm teilhaben. Der ISP würde dann das E-Mail-Aufkommen und die Beschwerdequote für jeden einzelnen seiner Kunden überwachen. Auf diese Weise wäre sichergestellt, dass keiner von ihnen ein Spammer ist.

Akzeptierten die meisten gewöhnlichen Nutzer ein solches System (und es gibt kaum Gründe, warum sie es nicht tun sollten), ließen sich Spamfilter einrichten, die mit nichtregulärer E-Mail weit aggressiver umgehen. Dies würde den größten Teil der Junknachrichten stoppen. Reputationssysteme lassen sich mit Frage-Antwort-Systemen kombinieren, um denjenigen, die nicht teilnehmen können, eine alternative Methode zum Versand ihrer E-Mails zu bieten.

Ein ergänzender Ansatz zur Spambekämpfung wären Anti-Spam-Gesetze. In den USA trat im Januar 2004 das Can-Spam-Gesetz in Kraft. Es erklärt den Spamversand nicht für rechtswidrig, sondern verbietet nur besonders extreme Formen, etwa den Gebrauch gefälschter Absenderinformationen. Leider hatte das Can-Spam-Gesetz bislang noch keine erkennbare Wirkung. Seit es in Kraft trat, hat sich der Anteil der E-Mails mit gefälschter »Von:«-Adresse sogar von 41 auf 67 Prozent erhöht. Europäische Staaten haben sehr viel schärfere Gesetze erlassen, die es Versendern verbieten, einem Empfänger ohne dessen ausdrückliche Genehmigung kommerzielle E-Mails zu schicken. Soweit wir wissen, haben sich solche Gesetze als einigermaßen erfolgreich erwiesen – zumindest zur Verhinderung von Spam seitens großer, bekannter Unternehmen.

Natürlich vermag kein Gesetz eines einzelnen Landes die Spamflut einzudämmen. Nur rund die Hälfte aller Spams kommt direkt aus den USA, der Rest stammt aus Europa oder Asien. Nur bei einem Drittel der etwa in den USA via Spam angebotenen Produkte muss der Anbieter auch eine USA-Adresse haben. Andere Anbieter, die pornografische Inhalte vermarkten, »Wundermittel« aus Kräutern feilbieten oder E-Mails zum Ausspionieren vertraulicher Daten absenden, befinden sich schon im Ausland, können leicht in Off-Shore-Gebiete abwandern oder sind bereits illegal.

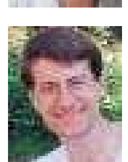
Industrie, Open-Source-Programmierer und Hochschulen suchen auch weiterhin gemeinsam nach Mitteln, um Spam aus der Welt zu schaffen. Wir haben kürzlich die erste offizielle Konferenz zu diesem Thema abgehalten – die »Konferenz über E-Mail und Anti-Spam«. Dort zeigten IBM-Ingenieure, wie sich Techniken der Bioinformatik, mit der ursprünglich Muster in Genen aufgespürt werden, dafür nutzen lassen, in Spam bestimmte Schemata zu finden. AOL-Forscher präsentierten »multiple Fingerabdrucksysteme«, die Täuschungsmanövern der Spammer besser auf die Schliche kommen sollen. Ein Team von der University of California in Davis wies nach, dass maschinell lernende Spamfilter durch Zufügen einiger gewöhnlicher Wörter überwunden werden können – und zeigte zugleich, dass die Filter durch spezielles Training besser vor diesen Attacken schützen können.

Wir haben wenig Zweifel, dass eine Kombination aus heutigen und künftigen Techniken am Ende über das Spam triumphieren wird. Es ist nur noch eine Frage der Zeit, bis unerwünschte E-Mails in Ihrem Postfach ausschließlich von Leuten stammt, die Sie kennen und denen Sie vertrauen – und nicht mehr von Spammern, die etwas verkaufen oder schlicht betrügen wollen. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE







Joshua Goodman (oben), **David Heckerman** (Mitte) und **Robert Rounthwaite** arbeiten bereits seit vielen Jahren zusammen. Gemeinsam mit anderen entwickelten Heckerman und Rounthwaite 1997 den ersten selbstlernenden Spamfilter. Heckerman leitet das »Machine Learning and Applied Studies«-Team (MLAS) in der Forschungsabteilung von Microsoft. Rounthwaite leitet zurzeit die Implementierung von Anti-Spam-Software. Goodman ist Mitglied des MLAS-Teams.

Spam wars: Our last best chance to defeat spammers, scammers and hackers. Danny Goodman. Select Books, 2004

Learning to filter unsolicited commercial e-mail. Von Ion Androutsopoulos, Georgios Paliouras und Eirinaios Michelakis. Technischer Report 2/2004, NCSR Demokritos

Webseite der US Federal Trade Commission zum Thema Spam: www.ftc.gov/spam

Erste und zweite Konferenz über E-Mail und Anti-Spam: www.ceas.cc

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

REZENSIONEN

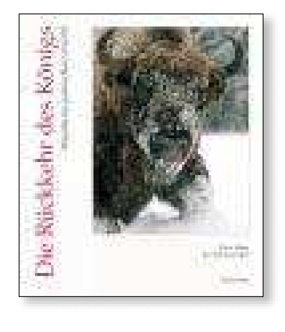
ZOOLOGIE

Klaus Nigge und Karl Schulze Hagen

Die Rückkehr des Königs

Wisente im polnischen Urwald

Tecklenborg, Steinfurt 2004. 167 Seiten, € 49,90



Ob die Autoren mit dem Titel ihres Buchs auf den gleichnamigen letzten Teil der weltberühmten Fantasy-Trilogie »Herr der Ringe« anspielen wollten? Ich weiß es nicht; aber fantastisch ist die Welt des Wisents allemal.

Bison bonasus, das größte Landsäugetier Europas, war als edles Jagdwild so begehrt, dass der kraftvolle Bewohner dichter Wälder zu Beginn des 20. Jahrhunderts fast ausgerottet war. Der letzte frei lebende Wisent Europas wurde 1919 durch Wilderer erlegt. Nur noch 57 Tiere lebten verstreut in europäischen Zoos und Tierparks. Einzelne Engagierte, darunter der Direktor des Frankfurter Zoos, Kurt Priemel, riefen ein internationales Zuchtprogramm ins Leben, in dessen Rahmen 1929 alle noch verfügbaren Wisente in ein umzäuntes Reservat des Walds von Bialowieza verbracht wurden.

Zu 40 Prozent im Nordosten Polens, zu 60 Prozent in Weißrussland gelegen, ist dieser Wald heute eine der letzten Urwaldlandschaften Europas und Heimat für zahlreiche seltene Pflanzen und Tiere. Von 1500 Quadratkilometern Biosphärenreservat sind 105 auf polnischer Seite Nationalpark; ein Kernbereich ist bereits seit 1921 strenges Naturschutzgebiet und nicht öffentlich zugänglich.

Trotz Rückschlägen im Zweiten Weltkrieg gelang es bis 1966, die Zahl der Tiere auf der polnischen Seite auf 157 zu erhöhen. Heute lebt dort mit 300 Tieren die größte Herde frei lebender Wisente in Europa.

Eigentlich wollten der Fotograf und Biologe Klaus Nigge und der Biologe Karl Schulze Hagen gar nicht Wisente finden, sondern Reste der längst verlorenen mitteleuropäischen Urlandschaft. So wurden ihre Erwartungen weit übertroffen. In ausgezeichneten Fotografien dokumentiert Nigge neben der urtümlichen Waldlandschaft das Leben der Wisente im Jahreslauf.

Die Faszination für dieses Tier hat schon unsere Vorfahren ergriffen, wie zahlreiche Höhlenmalereien bezeugen, und ist nachvollziehbar. Bullen erreichen eine Länge von 3 Metern, eine Schulterhöhe von 1,8 bis 2 Metern und ein Gewicht von 800 bis 1000 Kilogramm. Entgegen dem ersten Anschein sind Wisente sehr wendig und schnell. So können sie bis zu 2 Meter hohe Hindernisse ebenso überspringen wie 3 Meter breite Gräben; im Sprint erreichen sie eine Geschwindigkeit von 60 Stundenkilometern. Eine erfahrene Kuh ist Leittier einer Herde von 5 bis 13 Tieren, die ein Revier von durchschnittlich 70 Quadratkilometern beansprucht.

Auch wenn es heute weltweit mehr als 3000 Wisente gibt, so ist das Fortbestehen der Art noch nicht gerettet. Da die Stammzuchtgruppe sehr klein war und die neuen, größeren Herden untereinander keinen Austausch haben, muss man mit gezielten Vermischungsmaßnahmen der Inzucht begegnen. Für die Zukunft ist zu hoffen, dass die Rückkehr des Königs weiterhin erfolgreich verläuft.

Neben dem dominierenden Fototeil bieten sieben kurze Textbeiträge mit den Themen Urzeit, Untergang, Bialowieza, *Bison bonasus*, Rückkehr, Jagdgeschichten und Zukunft ergänzende Sachinformationen. Insgesamt bietet das Buch einen ganz besonderen Seh- und Lesegenuss, auch für diejenigen, die für den König unserer Urwälder bislang kein Interesse aufbringen konnten.

Wilfried Rosendahl

Der Rezensent ist promovierter Geoarchäologe und Kurator an den Reiss-Engelhorn-Museen in Mannheim.

Im Nationalpark von Bialowieza müssen die Wisente in der Regel von Ende November bis Anfang März mit einer geschlossenen Schneedecke leben.



WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Siegfried Bär

Die Zunft

Das Wesen der Universität, dargestellt an der Geschichte des Professorwerdens und des professoralen Liebeslebens

Laborjournal-Verlag, Merzhausen 2003. 364 Seiten, € 29,80

Siegfried Bär hat es also wieder getan: ein etwas kontroverses und provozierendes Buch über das Hochschulwesen zu schreiben, diesmal historisch aufgezogen. Recht bekannt geworden ist sein »Machiavelli für Forscher« (»Forschen auf Deutsch«, siehe Spektrum der Wissenschaft 12/1993, S. 134). Aber wer ist Siegfried Bär? Als Beruf gibt er »Enthüllungsjournalist« an; seit 1994 ist er Redakteur und Mitherausgeber des anzeigenfinanzierten »Laborjournals«, das kostenlos biologischen Labors zur Verfügung gestellt wird und derzeit eine der ganz wenigen Publikationen ist, in denen die Autoren sich noch trauen, Klartext zu reden. Mehr kann man unter www.laborjournal.de selbst herausfinden, ein Besuch der Webseite lohnt sich.

Zum zehnten Geburtstag der Zeitschrift hat er auch sein Alter Ego preisgegeben: Als Hubert Rehm ist er seriöser Redakteur, als Siegfried Bär »Obereinheizer« des Laborjournals (wobei die Fotos auf der Redaktionswebseite eher die gegenteilige Vermutung nahe legen).

Was hat der Bär diesmal zu enthüllen? Das Wesen der Universität und ihre mannigfachen Mechanismen des Selbstschutzes in Form von Abgrenzung und Erstarrung – »zünftig« eben, mit der Konsequenz, eigentlich nicht reformierbar zu sein. Sehr zum Leidwesen der politischen Klasse, die das immer wieder versucht und meistens scheitert.

Enthüllungen leben von Skandalen und sind somit auf Persönlichkeiten angewiesen, je schillernder, desto besser. So verwundert es wenig, dass der Bär für seine Darstellung farbige bis gefärbte Kurzbiografien entwirft. Dabei treten auf:

▶ der Theologe und Philosoph Peter Abälard (1079–1142), der wegen unkonventionellen Zusammenlebens mit seiner Geliebten Héloise im Auftrag ihrer Verwandten entmannt und daraufhin Mönch wurde;

▶ der Jurist und Humanist Ulrich Zäsi (1461–1535), Verfasser des Freiburger Stadtrechts und Begründer der humanistischen Rechtswissenschaft, der sich mit Wortgewandtheit, Fleiß und Hartnäckigkeit durchsetzte;

▶ Johann Jacob Moser (1701–1785), Jurist und Vater des deutschen Staatsrechts, der aus ärmlichen Verhältnissen zum schwäbischen Volkshelden aufstieg;

▶ Justus Liebig (1803–1873), der außer den Düngemitteln und Suppenwürfeln, für die er bekannt wurde, bahnbrechende Beiträge zur Chemie leistete;

▶ Fritz Haber (1868–1934), der 1918 für die Ammoniak-Synthese den Nobelpreis bekam und im Ersten Weltkrieg den Einsatz von Giftgas vorantrieb;

▶ der Mediziner Sigmund Rascher (1909–1945), der mit esoterischen Versuchen zur Kristallbildung als Diagnoseverfahren begann, im KZ Dachau mörderische Experimente an Gefangengen durchführte und wegen seiner abenteuerlichen Familienverhältnisse bis hin zum Kindesraub durch Genickschuss hingerichtet wurde. ▷



MATHEMATIK

Hans-Hermann Dubben, Hans-Peter Beck-Bornholdt

Mit an Wahrscheinlichkeit grenzender Sicherheit

Logisches Denken und Zufall

Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek 2005. 220 Seiten, € 8,90

»Das Meiste in diesem Buch gibt es schon woanders und meistens anders.« Stimmt. Die Physiker Hans-Hermann Dubben und Hans-Peter Beck-Bornholdt, die am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf forschen und lehren, präsentieren uns nicht brandneue Forschungsergebnisse, sondern die klassischen Überraschungen aus der Statistik: Ein Test, der eigentlich sehr gut ist, aber auf eine seltene Krankheit angewandt wird, liefert erschreckend häufig falsch-positive Befunde. Eine Mehrheit von Wählern hält *A* für besser als *B*, *B* für besser als *C* – und *C* für besser als *A*; nur ist es jedes Mal eine andere Mehrheit. Ein Mann, dessen »genetischer Fingerabdruck« mit einer Sicherheit von 99,999 Prozent zu der am Tatort vergefundenen DNA passt, ist deswegen noch lange nicht der Täter. Die Eins als erste Ziffer in einer Zahlenangabe (Preis, Einwohnerzahl, Hausnummer …) ist häufiger als jede andere Ziffer. Eine neue Umgehungsstraße macht für alle Autofahrer die Fahrzeiten länger (das Braess'sche Paradox). Und natürlich das berüchtigte Ziegenproblem: Ja, es ist sinnvoll, seine Wahl zu revidieren, nachdem der Quizmaster eine Tür mit Ziege geöffnet hat.

Der Scharfschütze schießt wild auf die Wand und malt dann eine Zielscheibe an die Stelle, wo zufällig zwei Löcher dicht benachbart liegen. Eindrucksvoller wird der »Beweis« seiner Treffsicherheit, wenn er hinterher alle anderen Löcher zuspachtelt.

Die große Kunst liegt hier in der Zubereitung. Die Autoren haben die Ware »gerupft, klein geschnitten, gewürzt, garniert oder naturbelassen und im Taschenbuchformat serviert«. Und darin sind sie wahre Meister, wie sie schon in »Der Schein der Weisen« (Spektrum der Wissenschaft 12/2002, S. 112) unter Beweis gestellt haben.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



▷ Irgendeine Ausgewogenheit in der Liste dieser »Helden« ist nicht zu erkennen und auch nicht beabsichtigt. Im Gegenteil: Unterwegs geht es respektlos zur Sache, mitunter auch deftig, wobei viele Größen ihr Fett abbekommen. So auch Wilhelm von Humboldt, an dem der Autor wenig Verehrenswertes erkennen mag und den er für hoffnungslos überschätzt hält – vielleicht nicht ganz zu Unrecht. Wichtiger für den Aufstieg der deutschen Universitäten um 1900 erscheint ihm die im Wesentlichen zentral durchgeführte Berufungspolitik der Herren Friedrich Althoff (1839–1908) und Carl Heinrich Becker (1876–1933), und auch daran dürfte etwas Wahres sein. Dennoch ist diese Politik kaum als Vorbild für heutige Zeiten geeignet, da Forschungsminister mit Weitblick und Maß seltener sind als Regen in der Südsahara.

Das Buch liest sich flüssig, ist kurzweilig geschrieben und (löblich!) fadengeheftet, was mehrfaches Öffnen ohne Zerfall in eine Blättersammlung ermöglicht. Dafür hapert es an der Bekämpfung des Druckfehlerteufels. Man darf nicht alles ganz ernst nehmen und sollte bedenken, dass der Autor aus der (experimentellen) Chemie kommt. Daher sind einige Analysen, wie er selbst zugibt, nicht repräsentativ zum Beispiel für geisteswissenschaftliche oder theoretische Fächer. Gleichwohl hat der Bär einige wunde Punkte der Universität aufgespürt.

Etwas enttäuscht haben mich die Verbesserungsvorschläge am Ende des Buchs. Teilweise lesen sie sich wie eine schlechte Abschrift der unreflektierten Kochrezepte von Frau Bulmahn. Diese lassen sich weder aus den hier vorgestellten Beobachtungen ableiten, noch haben sie bislang in der Praxis irgendeinen positiven Effekt hervorgerufen. Und sie werden es auch nicht tun.

Man sollte das Buch also mit wachem Auge lesen, seine Schlüsse aber selbst ziehen. Und hoffen, dass auf Bundes- und Landesebene rechtzeitig wieder Vernunft einzieht, bevor die viel zitierten besten Köpfe endgültig das Weite gesucht haben. Oder konkreter: Die politische Klasse muss einsehen, dass die Ressource Geld allein nichts bewirken kann, wenn die Ressource Zeit missachtet wird. Man kann gute Ideen nicht einfach kaufen, man muss sie suchen und finden.

Michael Baake

Der Rezensent ist Professor für Mathematik an der Universität Bielefeld.

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online

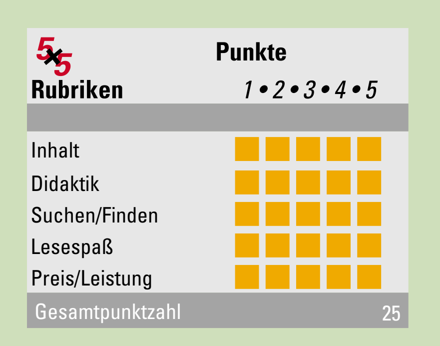


Robin Lane Fox
Alexander der Große
Eroberer der Welt
4. Auflage, Klett-Cotta, Stuttgart 2005, 827 Seiten € 29,–

Der genialste Feldherr der Weltgeschichte sah sich als »neuer Achilleus«, war rücksichtslos und cholerisch, voller Tatendrang und eroberte ein riesiges Weltreich, das sich weit über die Grenzen der bis dahin bekannten Welt erstreckte, bis er im Alter von nur 34 Jahren starb. Andererseits schuf der kultivierte, von Homer begeisterte Mann die Grundlagen der hellenistischen Weltkultur, die bis heute nachwirkt.

Dass das Alexanderbild der Moderne in sich sehr widersprüchlich ist, beruht auch auf der Widersprüchlichkeit der Quellen; schließlich galt Alexander bereits unter seinen Zeitgenossen als umstrittene Figur. Diese Gegensätze stören den Leser kaum; einmal angefangen, wird er das Buch nicht mehr aus der Hand legen.

Aus der Rezension von Margit Brinke und Peter Kränzle



5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Didaktik	■■■■■
Suchen/Finden	■■■■■
Lesespaß	■■■■■
Preis/Leistung	■■■■■
Gesamtpunktzahl	25

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter **http://www.wissenschaft-online.de/rezensionen**



HIRNFORSCHUNG

Benjamin Libet
Mind Time
Wie das Gehirn Bewusstsein produziert
Aus dem Amerikanischen von Jürgen Schröder.
Suhrkamp, Frankfurt am Main 2005. 304 Seiten, € 19,80

Seit der amerikanische Neurowissenschaftler Benjamin Libet, Jahrgang 1916, Ende der 1950er Jahre zu forschen begann, beschäftigt ihn nach eigenen Worten »die tiefschürfende Frage, wie unser bewusster Geist mit dem Gehirn verknüpft ist«. Von Anfang an war er nicht gewillt, den Geist – darunter versteht er die »innerlich beobachtbaren ›mentalen‹ Eigenschaften« – auf Hirnvorgänge – die »von außen beobachtbaren ›physikalischen‹ Ereignisse« – zu reduzieren.

Libets gesamtes Forschungsprogramm beruht, wie sein Buch mit dem Nachdruck einer Kampfschrift betont, auf einem nicht-reduktionistischen, dualistischen Konzept von Gehirn und Geist: Nicht nur neuronale Vorgänge bedingen mentale Ereignisse, sondern umgekehrt vermag auch der Geist Nervenprozesse zu steuern. In mittlerweile berühmten und viel diskutierten Experimenten untersuchte Libet immer wieder die Frage, wie subjektives Erleben und neurophysiologische Prozesse zusammenhängen. Insbesondere interessierte ihn, welche Zeitangaben Testpersonen über ihre Sinnes- oder Willenserlebnisse machen, während parallel der objektive Zeitverlauf neuronaler Erregungsmuster gemessen wird.

Wie sich herausstellte, klaffen mentales Erlebnis und Nerventätigkeit um mehrere Zehntelsekunden auseinander. Es dauert zum Beispiel rund eine halbe Sekunde, bis eine direkte Reizung der sensorischen Hirnrinde mit schwachem Wechselstrom als vermeintlicher Hautreiz bewusst wahrgenommen wird; diese Zeit braucht das Gehirn offenbar, ein sensorisches Bewusstsein zu produzieren.

Wenn Libet hingegen die entsprechende Hautpartie reizte, fand er, dass die Versuchsperson den Hautreiz unverzögert erlebte. Offenbar datiert das Gehirn die bewusste Reizwahrnehmung um die Dauer der Reizverarbeitung zurück und verschafft dem Bewusstsein durch diesen Trick ein augenblickliches Sinneserlebnis.

Noch berühmter wurden Libets Experimente zum Willenserlebnis. Schon vor dem Zeitpunkt, den die Versuchsperson für den bewussten Entschluss zu einer willkürlichen Handbewegung angibt, baut sich im Gehirn das diese Bewegung vorbereitende Bereitschaftspotenzial auf (Spektrum der Wissenschaft 4/2005, S. 90). Damit wird die intuitiv erwartete Abfolge – erst »geistiger« Willensakt, dann »körperliche« Aktion – auf den Kopf gestellt.

Libet will das Leben der Seele nach dem Tod beweisen, indem er den Körper fast umbringt

Diese Befunde scheinen ein harter Schlag für einen Dualisten, der an die Autonomie mentaler Prozesse und somit an eine Unabhängigkeit des Geistes von der Materie glaubt. Belegen nicht alle Libet-Experimente, wie stark geistige Erlebnisse – ob Wahrnehmungen oder Entschlüsse – von vorhergehenden unbewussten Hirnvorgängen abhängen?

Überraschenderweise zieht Libet andere Konsequenzen. Er distanziert sich zwar vom radikalen Dualismus seines Lehrers John Eccles, welcher annahm, an den Synapsen würden eigene geistige Einheiten namens Psychonen die Nerventätigkeit steuern. Aber auch Libet beharrt darauf, es könne geistige Phänomene ohne »direkte neuronale Grundlage« geben sowie einen bewussten Willen, der »nicht immer den Naturgesetzen der physischen Welt gehorcht« (S. 230). Alles andere wäre »deterministischer Materialismus«, der uns zu »Automaten« stempelt, »die durch unerbittliches Festhalten an nachgewiesenen physikalischen Gesetzen beherrscht werden« (S. 266). Man sieht förmlich die arme Seele, wie sie sich flehend gegen die Gitterstäbe der ehernen Naturgesetze wirft.

Libet schlägt vielmehr vor, im Gehirn nach einem »bewussten mentalen Feld« zu suchen, das nicht physikalisch messbar, sondern nur der Introspektion zugänglich sei. Dieses Feld wäre ein »emergentes« Produkt des gesamten Gehirns, nicht der Summe aller Neuronen, und würde deshalb selbst dann weiterbestehen, wenn eine komplette Scheibe der Hirnrinde neurochirurgisch abgetrennt würde. Eine Reizung dieser isolierten Hirnscheibe würde also ein bewusstes Erlebnis auslösen. Libet bedauert, dass dieser Versuch noch aussteht, weil eine passende und willige Versuchsperson verständlicherweise schwer zu finden ist.

Ein anderes Experiment, das Libet gern realisiert sähe, betrifft das Weiterleben der Seele nach dem Tod. Eine Person mit Herzschrittmacher müsste einwilligen, dass das Gerät mehrere Minuten lang ausgeschaltet wird. Während sie das Bewusstsein verliert und im Rahmen einer typischen Nahtod-Erfahrung als Seele über ihren Körper aufzusteigen meint, müsste das Versuchsteam für kurze Zeit die Zimmereinrichtung und das eigene Aussehen gründlich verändern, aber rasch dafür sorgen, dass alles wieder aussieht wie vorher, sobald die Testperson das Bewusstsein wiedererlangt. Falls dieser Lazarus sich nach dem Erwachen an die Nahtod-Erfahrung erinnert und dabei die heimlichen Veränderungen zutreffend beschreibt, ist das Leben der Seele nach dem Tod bewiesen.

Ungeachtet solch gespenstischer Spekulationen sind die berühmten Libet-Experimente schon Teil der Wissenschaftsgeschichte, und deren ausführliche Darstellung lohnt schon allein die Lektüre. Dabei stört allerdings der schlampige Umgang mit den Abbildungen. Die Kurve auf S. 76 erscheint als identische Fotokopie auf S. 86 wieder, allerdings anders beschriftet, mit anderer Quellenangabe und ohne Erklärung. Erklärungen in den Bildunterschriften sind schwer- bis unverständlich.

Auch im deutschen Fließtext sprießt manche Stilblüte. So meint Libet über sein Lieblingsthema, »die Beeinflussung des Gehirns durch den Geist«, dazu habe es unter Theologen und Philosophen schon viele Ansichten gegeben, und der Übersetzer lässt ihn fortfahren: »Diese Ansichten hatten wichtige und herausfordernde Wirkungen auf die gesamte Weltbevölkerung.« Die herausfordernde Wirkung dieses Satzes gleicht der eines prallen Luftballons.

Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

Dammis Abenteuer mit Scheinkräften

Wir spüren die Schwerkraft nicht. Was wir wahrnehmen, sind die uns deformierenden Kräfte, die der Schwerkraft entgegenwirken.

Von Norbert Treitz

Dammi ist ein Körper aus lauter gleich schweren Punktmassen und fast masselosen elastischen Federn dazwischen. Er kann wahrnehmen – und wir können sehen –, ob seine Federn gedehnt oder gestaucht sind. Mitunter macht er sich Gedanken über den Zustand seiner einzelnen Körperteile und deutet sie mehr oder weniger konsistent. Manchmal benutzt er – unter dem Namen »Dummy« – Verkehrsmittel oder fährt Karussell, manchmal lässt er sich wie ein Apfel vom Baum fallen oder als Tennisball missbrauchen. Besonders gerne ist er Astronaut.

Offenbar spielen beschleunigende Kräfte bei seiner Bewegung eine entscheidende Rolle. Hier auf dem Erdboden stört uns die Allgegenwart einer beschleunigenden Kraft, der Schwerkraft. Da wir sie nicht, wie die elektrostatische Anziehungskraft, durch Kräfte umgekehrten Vorzeichens kompensieren können, beschränken wir uns auf eine horizontale Ebene, zum Beispiel einen reibungsarmen Luftkissentisch, oder wir werfen Dammi in die Luft und betrachten nur die Bewegung seines Schattens auf dem senkrecht von oben beleuchteten Tisch. Solange keine turbulenten Reibungen oder Magnetfelder die Größen der einzelnen Dimensionen miteinander koppeln, dürfen wir die Schwerkraft vorübergehend vergessen.

Randkräfte: In dieser Ebene können wir unseren ansonsten kräftefreien Dammi auf zwei Weisen beschleunigen. Die erste Möglichkeit: Wir ziehen, mit dem Finger oder eigens befestigten Fäden, an einer oder mehreren Punktmassen an seiner Oberfläche. Dadurch werden diese Punktmassen beschleunigt und die benachbarten Federn gedehnt. Ziehen wir mit einem Ruck, so wandert eine Zugwelle durch den Dammi. Wenn wir über längere Zeit mit konstanter Kraft nach vorn ziehen und die Zugwellen abgeklungen sind, wird Dammi als Ganzes gleichmäßig beschleunigt, ist aber vorne stark gedehnt, in der Mitte nur halb und hinten gar nicht.

Beim Drücken auf die Rückfläche wird das hintere Ende stark gestaucht, die Mitte nur halb so stark und das vordere Ende gar nicht. Ganz drastisch ist es, wenn Dammi als Tennisball dient: Beim Kontakt mit dem Schläger verformt er sich fast halbkugelförmig, mit der flachen Seite am Schläger. In beiden Fällen kann Dammi seine inneren Federlängen abfragen und zu dem Ergebnis kommen, dass etwas ihn zieht beziehungsweise schiebt, und er kann zwischen beiden Ereignissen unterscheiden.

Falls jemand gemeinerweise Dammi mitten durchgeschnitten hat, so wird beim Ziehen am vorderen Ende nur die vordere Hälfte beschleunigt, und die hintere bleibt unbeschleunigt und unverformt. Wenn man den Dammi aber mit gleicher Kraft von vorn nach hinten und von hinten nach vorn drückt, bleibt er unbeschleunigt, ist aber von vorne bis hinten gleichmäßig gestaucht. Das ist die gewöhnliche Nutzung einer Feder in der Statik, entsprechend umgekehrt auch mit Dehnung bei Zug. Braucht man also zwei Kräfte zu einer Verformung? Nein, zu einer gleichmäßigen aber wohl.

Kräfte, die in der beschriebenen Weise ein Objekt von seiner Oberfläche oder seinem Rand her erfassen, werden manchmal Oberflächenkräfte genannt. Leider wird diese Bezeichnung nicht einheitlich verwendet, daher wollen wir sie sicherheitshalber Randkräfte nennen.

Volumenkräfte: Die andere Möglichkeit, Dammi zu beschleunigen, sieht technisch viel schwieriger aus. Wir binden an jede einzelne seiner Punktmassen einen Faden und ziehen an allen zugleich mit gleichen Kraftvektoren. Dabei bekommen alle Punktmassen, auch die mitten im Inneren, die gleiche Beschleunigung, und es gibt weder Wellen noch Verformungen im Dammi. Sollte ihn jemand durchgeschnitten haben, so merkt man nichts davon, denn der vordere und der hintere Teil werden gleichermaßen beschleunigt.

Solche »Volumenkräfte« sind die elektrostatische Kraft – was sich leider nur ausnahmsweise, zum Beispiel in Ladungswolken, bemerkbar macht, da elektrische Ladungen in einem Festkörper an die Oberfläche zu drängen pflegen – und vor allem die Gravitation. Die Erde zieht nicht etwa am unteren Ende des Apfels, sondern an allen seinen Teilen gleichermaßen. Wenn er herunterfällt, merkt man nicht, ob er vorher waagerecht durchgeschnitten wurde – auch wenn er ausgetrocknet ist und die Kohäsion hier nicht mitspielt. Die Schwerkraft ist wie ein Gespinst aus vielen feinen Zugfäden: Jede Punktmasse im Apfel ist mit jeder in der Erde verbunden. Nur für ganz grobe Fragestellungen darf man sich die Schwerkraft wie einen einzigen Zugfaden zwischen den beiden Schwerpunkten vorstellen und auf keinen Fall als Fäden zwischen Erdoberfläche und Apfelunterseite.

Eine Bewegung mit reinen Volumenkräften ist zum Beispiel das, was ein Satellit im erdnahen Weltraum vollführt: eine Kepler-Ellipse oder allgemeiner eine Kegelschnittbahn. Für kurze Wege, bei denen wir das Schwerefeld der Erde als homogen annehmen dürfen, wird aus einem Stück Ellipsenbahn in Scheitelnähe eine Wurfparabel, die ihrerseits zu einem geradlinigen Aufstieg und Abfallen entarten kann. In all diesen Fällen bleibt Dammi ohne Verformungen, jedenfalls wenn er so klein ist, dass die Inhomogenität des radialen Felds vernachlässigbar ist. Seltsamerweise behauptet Dammi nun in all diesen Fällen, er sei schwerelos, obwohl er in Wirklichkeit nur frei von Randkräften ist.

Es wird noch verrückter: Wir binden zwei Dammis mit langen Fäden zwischen ihren Frontflächen zusammen und lassen sie – waagerecht – um ihren gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Das findet entweder auf einem Luftkissen-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

tisch oder im freien Fall statt, sodass wir durch Beschränkung auf die waagerechten Komponenten die Schwerkraft außer Acht lassen können. Beide Dammis werden dabei in ihren Bäuchen gedehnt, in ihren Rücken nicht. Nun behauptet Dammi, es gebe so etwas Ähnliches wie eine Schwerkraft nach außen. Er nennt sie »Zentrifugalkraft«, ein Wort, das er im Physikunterricht oder in einem Astronomiebuch aufgeschnappt hat, oder auch »künstliche Schwerkraft«, aber durchaus nicht Schwerelosigkeit.

Physik im Sessel: Wir setzen Dammi nun im Schwerefeld auf einen Sessel oder eine Liege oder eine Badezimmerwaage. Ohne diese Unterlagen würde die Schwerkraft ihn unverformt nach unten beschleunigen. Die Geräte aber verformen sich – in einem gedämpften Einschwingvorgang – so, dass sie mit Randkräften von unten gegen Dammi drücken, und zwar gerade so stark, dass die resultierende Kraft verschwindet und Dammi weder durch den Fußboden nach unten saust noch von den Sesselfedern durch die Zimmerdecke katapultiert wird. Wegen dieser Randkräfte – und somit nur mittelbar wegen der Schwerkraft – sind Dammis untere Körperteile etwas gestaucht.

Genau das spürt er fast pausenlos, wenn er irgendwo steht oder liegt oder sitzt, und er erkennt den Zusammenhang der Orientierung zu der Richtung, in die losgelassene Kugelschreiber sich zu bewegen pflegen. Wenn man Dammi aus dem Schlaf weckt, kann er mit geschlossenen Augen sagen, wo unten ist, was ihm im freien Fall nicht gelingen würde.

Auf der Startbahn drückt der Flugzeugsitz unseren Dammi sehr fest von hinten, sodass er die gleiche Beschleunigung bekommt wie das startende Flugzeug. Dieses Gefühl im Rücken kennt Dammi vom Liegen auf dem Sofa, nur ist es jetzt stärker. Wenn er mit geschlossenen Augen vom Start überrascht wird, glaubt er, sein Sessel sei mit ihm selbst darin nach hinten umgekippt worden, und die Schwerkraft sei stärker als sonst. Er geht sogar so weit zu behaupten, jemand würde ihn nach hinten drücken.

Was zeigt eigentlich eine Badezimmerwaage an? Auf jeden Fall die Dehnung ihrer eigenen Feder und damit auch die Kraft, mit der sie den auf ihr stehenden Menschen nach oben beschleunigt. Wenn der stillhält, ist diese Kraft das Negative der Schwerkraft zwischen ihm und der Erde. Hüpft der Mensch aber und hebt dabei vielleicht sogar ab, so ist das im Zeitmittel immer noch das Gleiche, denn der Mensch bleibt ja im Badezimmer, aber zu jedem einzelnen Zeitpunkt entspricht die Beschleunigung der Summe beider Kräfte. Die »gespürte Schwerkraft« ist dabei stets das Spiegelbild der Federkraft, also beim Abheben 0. Das ist »Schwerelosigkeit« im gleichen (nämlich irreführenden) Sinne wie im Erdsatelliten, aber auch wie bei jedem anderen Luftsprung.

Dammis Gewicht $\vec{G}$ und die Zugkraft $\vec{F}$ der Karussellkette addieren sich zur Zentripetalkraft $\vec{Z}$, welche die Gondel in die Kreisbahn lenkt. Aber Dammi hält die Richtung, die der Randkraft $\vec{F}$ entgegengesetzt ist, für »unten«.

Zentrifugalkräfte: Im Kettenkarussell beschleunigt die Schwerkraft Dammi ohne Verformungen nach unten, die Ketten ziehen nach schräg oben innen, die Sitzbank der Gondel drückt also von unten außen den Dammi nach oben innen, wobei der an der Kontaktfläche, also seinem nach außen unten orientierten Gesäß, gestaucht wird. Die Resultierende aller Kräfte zeigt genau waagerecht nach innen, sie ist die Zentripetalkraft, welche die Bahnkurve zu einem Kreis schließt.

Wenn man Dammi aber fragt, wo nach seinem Gefühl – mit geschlossenen Augen – »unten« sei, zeigt er nach unten außen und merkt von der Kreisbahn nichts; er fühlt sich nur etwas schwerer als sonst, aber völlig aufrecht in der Gondel sitzen. Mit offenen Augen sieht er dagegen, dass er auf einem Kreis fährt, dessen Achse senkrecht, nämlich rechtwink- ▷

▷ lig zum Kirmesplatz steht, und kommt zu dem Ergebnis, dass die von ihm gefühlte Schwerkraft, also das Entgegengesetzte der Randkraft, außer der richtigen Schwerkraft nach unten noch einen Beitrag waagerecht nach außen hat. Das nennt er dann die »Zentrifugalkraft«.

Wesen wie Dammi – wir zum Beispiel – können mit Nervenenden oder anderen Messeinrichtungen für interne elastische Spannungen genau die Randkräfte zur Kenntnis nehmen, nicht aber die Volumenkräfte. Die Vektorsumme aus beiden bestimmt die Beschleunigung. Sie ist im täglichen Leben fast dauernd null, also haben wir uns daran gewöhnt, das Negative der gespürten Randkraft für die Schwerkraft zu halten, die wir somit nur mittelbar erleben.

Gelegentlich verschwindet aber die Summe ausnahmsweise nicht; genauer: Die Randkräfte werden gleich null, während die Schwerkraft fortbesteht. Das geschieht in der freien Wildbahn nur sehr kurz beim Springen oder Fallen, über mehrere Sekunden hinweg und sehr stark praktisch nur in modernen Verkehrsmitteln und zum Zwecke des Nervenkitzels auf der Kirmes. Es kommt dann zu den Fehldeutungen bis zu der grotesken Bezeichnung »Schwerelosigkeit« für den Zustand in einer Umlaufbahn, die im Grunde nichts weiter ist als die Bahn eines waagerechten Wurfs. Nur bleibt sie dauernd waagerecht, im Gegensatz zur Bahn eines bodennahen waagerechten Wurfs, die nichts weiter ist als die absteigende Hälfte einer Wurfparabel. Die Bahn eines antriebslosen Raumschiffs ist eine Art freier Fall im Feld aller vorhandenen Massen, einschließlich der Sonne und des restlichen Universums.

Wenn ein Raumschiff auf der Umlaufbahn um einen Planeten in radialer Richtung so groß ist wie 10^{-6} mal der Bahnradius, so macht sich in dieser 6. Dezimalstelle bemerkbar, dass die Anziehungskraft des Planeten mit wachsender Entfernung abnimmt. Nach dem dritten Kepler'schen Gesetz hätten der innen und der außen laufende Teil etwas verschiedene Umlaufzeiten und würden auseinanderdriften, wenn sie nicht zusammengeschraubt wären. Jenseits der so genannten Roche-Grenze ersetzt die gegenseitige Gravitation die Schrauben. Dieser Grenzradius liegt je nach den Dichteverhältnissen beim Zwei- bis Dreifachen des Planetenradius und trennt für jeden Planeten im Wesentlichen die innere Zone der Ringe von der äußeren der (unverschraubten) Satelliten.

In unserem Raumschiff wird innerhalb der Roche-Grenze ein Faden zwischen zwei ansonsten freien Massen in radialer Richtung ganz leicht gespannt. Das nennt man die Gezeitenkraft, denn auch die Wassermoleküle im Meer auf der Erde verspüren sie, wenn diese im radialen Feld des Monds um den gemeinsamen Erde-Mond-Schwerpunkt kreist. Kleine Sandhaufen innerhalb der Roche-Grenze zerbröseln und gehen in einem Ring auf.

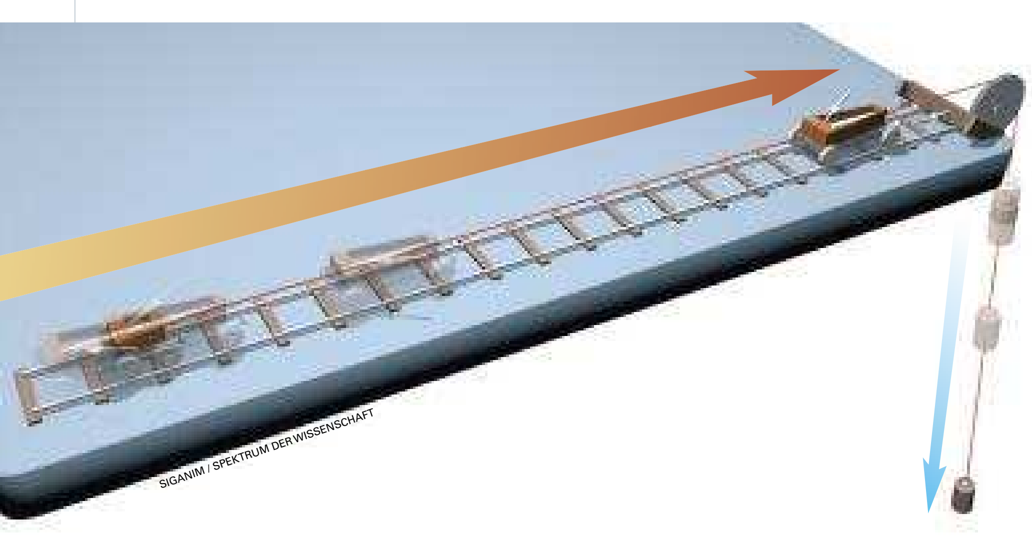
Das Metronom im Liegewagen: Was geschieht, wenn man eine klassische Pendeluhr – mit oder ohne Kuckuck – oder auch eine Sanduhr aus dem Fenster wirft? Sie bleibt schon beim Loslassen stehen. Und das, obwohl die Schwerkraft ja nun beim freien Fall so richtig ungestört und ganz allein wirken kann.

Um den Verbrauch an Pendeluhren in Grenzen zu halten, experimentieren wir besser mit einem möglichst kleinen mechanischen (nicht elektronischen) Metronom. Dieses hat ein kurzes Pendel mit waagerechter Achse und einem pendelnden Schwerpunkt darunter. Die Reibungsverluste werden durch eine Aufzugsfeder ersetzt (bei anderen Pendeluhren mit Kuckuck oder auf Türmen ist das »Aufziehen« noch ganz wörtlich zu verstehen). Die zum Musiküben benutzten Metronome haben eine verschiebbare Justiermasse für die verschiedenen Schlagtempi. Wenn man sie ganz abnimmt, bekommt man ein sehr schnelles Tempo.

Wenn man das Metronom auf den Rücken legt, sodass die Achse senkrecht und die Pendelebene waagerecht sind, schlägt es nicht, selbst wenn es aufgezogen ist und angestoßen wird. Es sei denn, man beschleunigt es – waagerecht – dorthin, wo beim Metronom normalerweise oben ist (Bild unten). Das Gerät schlägt dann hörbar mit gleichmäßiger Frequenz, die proportional zur Quadratwurzel aus der Beschleunigung ist.

Wir können das Metronom auch in vertikaler Position an ein langes Gummiband hängen. Es kann dann meterweit nach oben und unten schwingen und unterwegs hörbar schlagen. Am oberen Scheitel der Schwingung schlägt es am langsamsten und bleibt sogar stehen, falls das Gummiband völlig schlaff wird. Beim Durchgang durch die Mittelhöhe schlägt es so schnell wie ohne Gummiband auf dem Tisch und im unteren Scheitel am schnellsten. Hat das etwas mit der Schwerkraft zu tun oder eher mit der Spannung des Gummibands?

Unser Metronom ist ein Dammi: Unmittelbar wahrnehmen kann es nur Randkräfte. Genau genommen ist es nicht die Schwerebeschleunigung, die das ausgelenkte Pendel der Kuckucksuhr in Bewegung versetzt. Es ist die entgegengesetzt gerichtete Beschleunigung durch den Nagel in der Wand, die sich über das Gehäuse dem Aufhängepunkt der Pendelachse mitteilt. Die Schwerkraft hat in dieser Anordnung nur eine Hilfsfunktion: Sie verhindert, dass der Nagel die Pendeluhr himmelwärts treibt.



◀ **Ein Metronom liegt auf einem Waggon aus einer großen (Garten-) Modelleisenbahn, der über Faden und Umlenkrolle von einem Fallgewicht gleichmäßig beschleunigt wird.**

Für die Schwingungsperiode eines Pendels lernt man üblicherweise die Formel $T = \sqrt{l/g}$, wobei g die Schwerebeschleunigung ist und l die (mathematisch idealisierte) Pendellänge. Eigentlich muss es a statt g heißen, wobei a die (Randkraft-)Beschleunigung ist, die unmittelbar nur auf den Aufhängepunkt wirkt und erst dann auf die pendelnde Masse. Nur fällt das meistens nicht auf, weil für Kuckucksuhren und andere Allerweltspendel – bis auf das Vorzeichen – $a=g$ gilt. Wandernde oder zappelnde Uhren gelten eben als unpraktisch.

Scheinkräfte: Das theoretische Standardwerkzeug zur Erklärung von Zentrifugalkräften und Ähnlichem ist der Übergang zum (beschleunigten) Bezugssystem des Beobachters. Bereits dadurch, dass wir ein Objekt der Masse m in diesem System beschreiben, das mit a beschleunigt wird, bekommt es die Scheinkraft $-ma$ geschenkt, und das ist anscheinend auch die Kraft, die wir spüren.

Das ist aber zu kurz gedacht: Unmittelbar spüren wir die Randkräfte und deuten sie mit umgekehrtem Vorzeichen als Summe aus Schwerkraft und Scheinkraft. Wenn keine Schwerkraft mitspielt wie bei der Rückenlehne, ist die Scheinkraft einfach das Negative der Randkraft. Die aber ist im Inneren von Dammi unabhängig vom Bezugssystem messbar: Die Zustände von Nervenenden oder Federlängen hängen nicht von dem Bezugssystem ab, das sich ein Betrachter aussucht. Die Scheinkräfte aus den Bezugssystem-Transformationen haben nur manchmal etwas mit den gespürten Scheinkräften zu tun und sind daher nicht der Schlüssel zu deren Verständnis.

Finden Sie die übliche Erklärung mit rotierendem Bezugssystem wirklich einfacher? ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEIS



Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

Brücke zur Physik. Von Norbert Treitz. 3. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 2003

PREISRÄTSEL

Stimmt!

Von Roland Mildner

Die Abbildung rechts oben zeigt eine verschlüsselte Additionsaufgabe, die in Worten gelesen offenbar richtig ist. Ersetzen Sie gleiche Buchstaben durch gleiche Ziffern und unterschiedliche Buchstaben durch verschiedene Ziffern des Dezimalsystems, sodass eine richtige Addition entsteht. Wie viele und welche Lösungen hat dieses Kryptogramm?

```
  FÜNF
+ FÜNF
------
  ZEHN
```

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Rucksäcke »Elefant«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 12. Juli 2005, eingehen.

Lösung zu »Alternatives Wohnen« (Mai 2005)

Insgesamt gibt es 216 verschiedene Möglichkeiten, das Haus zu beziehen.

Hat man erst einmal eine zulässige Belegung gefunden, so findet man weitere Lösungen mit denselben Zahlen in anderer Anordnung.

Michael Huke aus Hofgeismar-Hümme betrachtete zunächst die Umstellungen, bei denen die Zahl in der linken oberen Ecke an Ort und Stelle bleibt. Man kann die zweite und die dritte Zeile vertauschen, ebenso die zweite und die dritte Spalte. Überdies lässt sich das ganze Quadrat an der Diagonalen von links oben nach rechts unten spiegeln. Alle Kombinationen dieser Umstellungen ergeben neue Lösungen, das sind $2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$ Stück.

Außerdem lässt sich jede beliebige Zahl in die linke obere Ecke bringen, indem man die Zeile und die Spalte, in der die Zahl steht, mit der ersten Zeile beziehungsweise Spalte vertauscht. Das sind nochmals neun Möglichkeiten. Insgesamt gibt es also $9 \cdot 8 = 72$ Lösungen für jedes Zahlensortiment.

Wie viele Zahlensortimente gibt es? Alle Hausbewohner müssen Teiler von 2010 sein. Jeder Primfaktor von $2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 67 = 2010$ muss in jeder Zeile und Spalte genau einmal erscheinen. Nun ordnet man die Wohnungskandidaten nach der Anzahl ihrer Primfaktoren:

- ▶ 4 Faktoren: 2010 (der »Vierer«)
- ▶ 3 Faktoren: 30, 402, 670, 1005 (die »Dreier«)
- ▶ 2 Faktoren: 6, 10, 15, 134, 201, 335 (die »Zweier«)
- ▶ 1 Faktor: 2, 3, 5, 67 (die »Einser«)
- ▶ 0 Faktoren: 1 (der »Nuller«)

Ein Dreier oder Vierer kann nicht vorkommen, da er sowohl in seiner Zeile als auch in seiner Spalte eine Eins erzwingen würde. Unter den elf übrigen Kandidaten sind neun auszuwählen; darunter sind mindestens vier Zweier.

Damit sind mindestens eine Zeile und eine Spalte doppelt mit Zweiern besetzt. Das kann nur funktionieren, wenn im Schnittpunkt dieser Zeile und dieser Spalte die Eins sitzt und die beiden Paare von Zweiern jeweils das Produkt 2010 ergeben. Mehr als vier Zweier dürfen es auf keinen Fall sein.

Damit ist die Auswahl des Sortiments schon sehr eingeschränkt: Man nehme den Nuller und alle Einser sowie zwei der Zweierpaare, die als Produkt 2010 ergeben. Und davon gibt es genau drei Kombinationen:

1, 2, 3, 5, 67, 6, 335, 10, 201
1, 2, 3, 5, 67, 6, 335, 15, 134
1, 2, 3, 5, 67, 15, 134, 10, 201

Man prüft leicht nach, dass jedes Sortiment eine zulässige Belegung ergibt.

Die Gewinner der zwei Kugelbahnen »VIA« sind Jörg Seitz, Arlesheim (Schweiz), und Walter Schneller, Würzburg.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Für die Schwingungsperiode eines Pendels lernt man üblicherweise die Formel $T = \sqrt{l/g}$, wobei g die Schwerebeschleunigung ist und l die (mathematisch idealisierte) Pendellänge. Eigentlich muss es a statt g heißen, wobei a die (Randkraft-)Beschleunigung ist, die unmittelbar nur auf den Aufhängepunkt wirkt und erst dann auf die pendelnde Masse. Nur fällt das meistens nicht auf, weil für Kuckucksuhren und andere Allerweltspendel – bis auf das Vorzeichen – $a=g$ gilt. Wandernde oder zappelnde Uhren gelten eben als unpraktisch.

Scheinkräfte: Das theoretische Standardwerkzeug zur Erklärung von Zentrifugalkräften und Ähnlichem ist der Übergang zum (beschleunigten) Bezugssystem des Beobachters. Bereits dadurch, dass wir ein Objekt der Masse m in diesem System beschreiben, das mit a beschleunigt wird, bekommt es die Scheinkraft $-ma$ geschenkt, und das ist anscheinend auch die Kraft, die wir spüren.

Das ist aber zu kurz gedacht: Unmittelbar spüren wir die Randkräfte und deuten sie mit umgekehrtem Vorzeichen als Summe aus Schwerkraft und Scheinkraft. Wenn keine Schwerkraft mitspielt wie bei der Rückenlehne, ist die Scheinkraft einfach das Negative der Randkraft. Die aber ist im Inneren von Dammi unabhängig vom Bezugssystem messbar: Die Zustände von Nervenenden oder Federlängen hängen nicht von dem Bezugssystem ab, das sich ein Betrachter aussucht. Die Scheinkräfte aus den Bezugssystem-Transformationen haben nur manchmal etwas mit den gespürten Scheinkräften zu tun und sind daher nicht der Schlüssel zu deren Verständnis.

Finden Sie die übliche Erklärung mit rotierendem Bezugssystem wirklich einfacher? ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEIS



Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

Brücke zur Physik. Von Norbert Treitz. 3. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 2003

PREISRÄTSEL

Stimmt!

Von Roland Mildner

FÜNF
+FÜNF
ZEHN

Die Abbildung rechts oben zeigt eine verschlüsselte Additionsaufgabe, die in Worten gelesen offenbar richtig ist. Ersetzen Sie gleiche Buchstaben durch gleiche Ziffern und unterschiedliche Buchstaben durch verschiedene Ziffern des Dezimalsystems, sodass eine richtige Addition entsteht. Wie viele und welche Lösungen hat dieses Kryptogramm?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Rucksäcke »Elefant«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 12. Juli 2005, eingehen.

Lösung zu »Alternatives Wohnen« (Mai 2005)

Insgesamt gibt es 216 verschiedene Möglichkeiten, das Haus zu beziehen.

Hat man erst einmal eine zulässige Belegung gefunden, so findet man weitere Lösungen mit denselben Zahlen in anderer Anordnung.

Michael Huke aus Hofgeismar-Hümme betrachtete zunächst die Umstellungen, bei denen die Zahl in der linken oberen Ecke an Ort und Stelle bleibt. Man kann die zweite und die dritte Zeile vertauschen, ebenso die zweite und die dritte Spalte. Überdies lässt sich das ganze Quadrat an der Diagonalen von links oben nach rechts unten spiegeln. Alle Kombinationen dieser Umstellungen ergeben neue Lösungen, das sind $2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$ Stück.

Außerdem lässt sich jede beliebige Zahl in die linke obere Ecke bringen, indem man die Zeile und die Spalte, in der die Zahl steht, mit der ersten Zeile beziehungsweise Spalte vertauscht. Das sind nochmals neun Möglichkeiten. Insgesamt gibt es also $9 \cdot 8 = 72$ Lösungen für jedes Zahlensortiment.

Wie viele Zahlensortimente gibt es? Alle Hausbewohner müssen Teiler von 2010 sein. Jeder Primfaktor von $2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 67 = 2010$ muss in jeder Zeile und Spalte genau einmal erscheinen. Nun ordnet man die Wohnungskandidaten nach der Anzahl ihrer Primfaktoren:

- ▶ 4 Faktoren: 2010 (der »Vierer«)
- ▶ 3 Faktoren: 30, 402, 670, 1005 (die »Dreier«)
- ▶ 2 Faktoren: 6, 10, 15, 134, 201, 335 (die »Zweier«)
- ▶ 1 Faktor: 2, 3, 5, 67 (die »Einser«)
- ▶ 0 Faktoren: 1 (der »Nuller«)

Ein Dreier oder Vierer kann nicht vorkommen, da er sowohl in seiner Zeile als auch in seiner Spalte eine Eins erzwingen würde. Unter den elf übrigen Kandidaten sind neun auszuwählen; darunter sind mindestens vier Zweier.

Damit sind mindestens eine Zeile und eine Spalte doppelt mit Zweiern besetzt. Das kann nur funktionieren, wenn im Schnittpunkt dieser Zeile und dieser Spalte die Eins sitzt und die beiden Paare von Zweiern jeweils das Produkt 2010 ergeben. Mehr als vier Zweier dürfen es auf keinen Fall sein.

Damit ist die Auswahl des Sortiments schon sehr eingeschränkt: Man nehme den Nuller und alle Einser sowie zwei der Zweierpaare, die als Produkt 2010 ergeben. Und davon gibt es genau drei Kombinationen:

1, 2, 3, 5, 67, 6, 335, 10, 201
1, 2, 3, 5, 67, 6, 335, 15, 134
1, 2, 3, 5, 67, 15, 134, 10, 201

Man prüft leicht nach, dass jedes Sortiment eine zulässige Belegung ergibt.

Die Gewinner der zwei Kugelbahnen »VIA« sind Jörg Seitz, Arlesheim (Schweiz), und Walter Schneller, Würzburg.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Die kurze Kindheit der Neandertaler

Sie lebten schneller und starben früh – zumindest scheinen ihre Zähne das zu belegen.

Viele feine Rillen im Zahnschmelz zeigt die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme vom Abdruck der Zahnoberfläche eines Neandertalers, der vor 41000 Jahren lebte. Eine neue Rille entsteht während des Zahnwachstums etwa alle neun Tage.



MIT FRDL. GEN. VON DEBBIE GUATELLI-STEINBERG, OHIO STATE UNIVERSITY

Von Pat Shipman

Sie waren anders. Dass die Neandertaler nicht zur selben Menschenart gehörten wie wir, lassen seit Neuerem auch Vergleiche von Erbsequenzen vermuten – obwohl noch strittig ist, ob sich die beiden Menschenformen gelegentlich kreuzten. Ihre menschliche Natur ist unverkennbar, auch ihre Ähnlichkeit mit uns (oder unsere mit ihnen) – doch in manchem unterscheidet sich der Neandertaler krass vom so genannten anatomisch modernen *Homo sapiens*.

Das zeigt schon ein Blick auf die Fossilien. Die Neandertaler besaßen einen viel robusteren, stärkeren Knochenbau. Und besonders ihr Schädel sah anders aus. Vor allem die mächtigen Überaugenwülste unter der flachen Stirn fallen auf. Das Gesicht darunter war spitzer, schmalwangiger gebildet, Nase und Kiefer sprangen weiter vor, und dieser Frühmensch hatte ein fliehendes Kinn. Der ausgeprägte Nasenknochen lag über breiten Öffnungen – offenbar war der Neandertaler mit einer großen, klobigen Nase ausgestattet. Sein Hirnschädel war flacher und länger geformt. Am Hinterhaupt trug er eine Vorwölbung, den Hinterhauptsknoten. Grob mutet die Gesamtkontur an, als hätte jemand an einem elastischen Schädelmodell eines heutigen Menschen vorn und hinten gezogen.

Nun gibt es unter den Evolutionsforschern Experten, die sich speziell mit der Kindheitsentwicklung befassen. Diese Leute untersuchen, ob sich in der Evolution biologische Entwicklungsschemata veränderten, zum Beispiel auch in der Anpassung an Lebensbedingungen. Schon länger beschäftigen sie sich mit der spannenden Frage, wie schnell Neandertalerkinder wohl groß wurden.

Wachstumsmuster an den Zähnen können darüber Aufschluss geben. Fernando Ramírez Rozzi vom französischen Nationalen Forschungszentrum (CNRS) in Paris und José Maria Bermúdez de Castro vom Nationalen Naturwissenschaftlichen Museum in Madrid verglichen zu diesem Zweck die Zahnentwicklung verschiedener europäischer Menschenformen. Und zwar untersuchten sie an Schneide- und Eckzähnen feine Rillen außen am Zahnschmelz, die periodisch während des Zahnwachstums entstehen (siehe Bild links). Hierzu kontrollierten sie Zähne von 55 Neandertalern, 39 anatomisch modernen Menschen der Frühzeit sowie von insgesamt 25 Vertretern des *Homo heidelbergensis*, dem Vorgänger des Neandertalers, und dem noch älteren ersten Europäer, dem rund 800000 Jahre alten *Homo antecessor*, den manche Forscher dem *Homo heidelbergensis* zuordnen.

Neandertaler wuchsen schneller

Fachlicher ausgedrückt nahmen Ramírez Rozzi und Bermúdez de Castro die Imbrikationsfurchen oder Perikymatien (nach griechisch *kymata* für Wellen) unter die Lupe. Bei der Gattung *Homo*, also auch bei unseren menschlichen Vorfahren, bildet und bildete sich in etwa alle neun Tage quer zur Wuchsrichtung eine neue Rille. Wenn man diese Furchen zählt, kann man also abschätzen, wie lange das Wachstum des Zahns dauerte.

Überraschenderweise – so lautet das erste Wort im Titel dieser Arbeit – scheint ein Ne-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

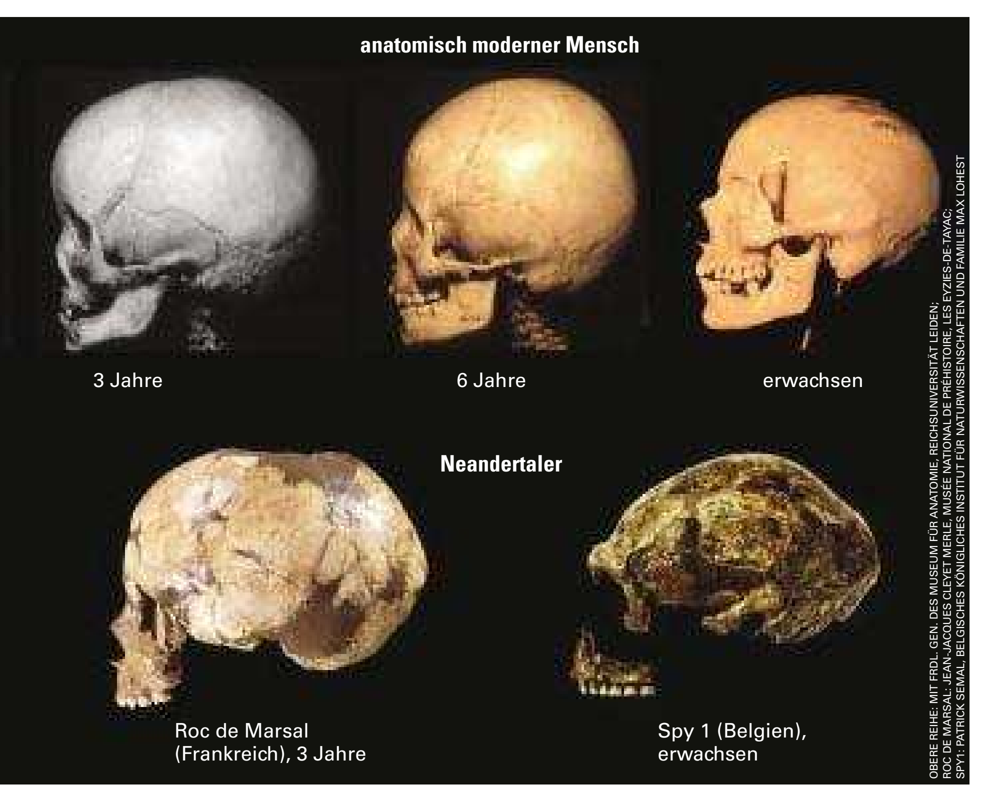
andertalerzahn deutlich schneller gewachsen zu sein, als von den Verwandtschaftsverhältnissen her zu erwarten gewesen wäre. Die Zahnbildung dauerte beim modernen *Homo sapiens* ein wenig länger als beim *Homo antecessor* und selbst noch beim *Homo heidelbergensis* – eine evolutionäre Entwicklung, die ins Schema der Menschenevolution passt. Doch die Neandertaler fielen aus der Rolle. So, als wären sie die älteste dieser Menschenformen und ständen den Tierprimaten am nächsten, beeilten sie sich mit dem Zahnwachstum und überholten sogar ihre Vorgänger. Für all jene Forscher, die davon überzeugt sind, dass Neandertaler und moderne Menschen zur selben Art gehören, bedeutet dieser Befund eine neue Herausforderung.

Anthropologen nehmen gern die Zahnbildung als Kriterium für die Reifung überhaupt, weil die Schritte der Zahnmineralisierung mit wichtigen Abschnitten von Skelett- und Gehirnwachstum sowie der geschlechtlichen Entwicklung recht gut übereinstimmen. Entsprechend folgern Ramírez Rozzi und Bermúdez de Castro: Um erwachsen zu werden, hätten die Neandertaler im Vergleich zum modernen Menschen durchschnittlich 15 Prozent Zeit eingespart. Setzt man für den modernen Menschen 18 Jahre bis zur vollen körperlichen Reife an, dann müssten die Neandertaler schon mit 15 Jahren so weit gewesen sein.

Die beiden Wissenschaftler haben aber nicht nur die Wachstumsrillen gezählt, sondern auch deren Abstände betrachtet. Was dabei herauskam, ist ebenso aufregend. An einem wachsenden Zahn bildet sich der erste Schmelz an der Spitze der Krone, die ja auch als Erstes erscheint. Der Vorgang setzt sich dann nach unten fort. Die obere Hälfte eines Zahns weist bei uns recht breite Abstände zwischen den feinen Querrillen auf. Nach unten zu werden sie wesentlich enger. Das zeigt, dass anfangs in Phasen von neun Tagen schnell Zahnschmelz zuwächst. Später erfolgt dies langsamer.

Offensichtlich wuchsen auch Neandertalerzähne nur zuerst rasch. Allerdings haben die unteren Rillen deutlich mehr Abstand als in unserem Gebiss. Die Zahnschmelzbildung verlangsamte sich beim Neandertaler dem- ▷

▲ **Ob Kinder vom Neandertaler (rechts) und modernen Menschen miteinander spielten, bleibt strittig. Auf jeden Fall wuchsen sie anders heran.**



▲ **Schon im Kindesalter hatten die Neandertaler Schädel mit charakteristischen anderen Proportionen.**

▷ nach nicht so stark wie beim modernen Menschen. Das Wachstumsschema ähnelt hierin eher dem von Menschenaffen, die deutlich früher zur körperlichen Reife gelangen als wir. Dem Neandertaler mag es im Vergleich zu uns ähnlich ergangen sein.

In ihrer Arbeit spekulieren Ramírez Rozzi und Bermúdez de Castro, diese Anpassung hätten die Neandertaler ihrer hohen Sterblichkeit entgegengesetzt. Die beschleunigte Reifung wäre somit ein Ausgleich für ein im Durchschnitt vergleichsweise kurzes Leben gewesen – was der Anthropologe Erik Trinkaus von der Washington University in St. Louis (Missouri) 1995 aufzeigte. Trinkaus hatte an Skelett- und Gebissteilen von 206 Individuen deren mutmaßliches Lebensalter bestimmt.

Zur Verblüffung der Fachwelt waren die meisten dieser Menschen auffallend jung gestorben, nämlich die überwiegende Mehrzahl (80 Prozent) von ihnen vor dem mittleren Lebensalter, was beim modernen Menschen 40 Jahren entspricht. Die größte Teilgruppe (40 Prozent) starb im frühen Erwachsenenalter, entsprechend zwischen 20 und 40 Jahren. Sogar der berühmte »Alte Mann von La Chapelle-aux-Saints« – der schon Zähne verloren hatte und unter Arthritis gelitten haben muss – war bei seinem Tod nur umgerechnet etwa 30 Jahre alt. Falls die Neandertaler tatsächlich in der Regel früh starben, hätte es einen selektiven Vorteil bedeutet, das Heranwachsen zu beschleunigen und entsprechend früher Kinder zu bekommen. Ein Nebeneffekt wäre gewesen, dass dann die besonders gefährdete Kindheit weniger lang dauerte.

Man könnte auch sagen: Die Neandertaler spurteten durch ihre Jugend, während wir sie gemächlich durchwandern. Nach den fossilen Zeichen unterschied sich besonders deren Endphase, vielleicht aber sogar manch anderer Streckenabschnitt. Was wissen wir über den Ablauf dieser Lebensstrecke beim Neandertaler? Wie wuchsen seine Kinder im Vergleich zu denen des modernen *Homo sapiens*?

Aufschlussreich ist dafür das Schädelwachstum. Obwohl die Schädelform eines anatomisch modernen Menschen und eines Neandertalers gut unterscheidbar ist, müsste das nicht zwangsläufig für die Kinderschädel gelten. Eine ähnliche Ausgangsform beim kleinen Kind könnte sich erst später zum charakteristischen Neandertalerschädel ausgewachsen haben. Denkbar wäre etwa, dass dieser seine besonderen Konturen erhielt, weil das Weiterwachsen bestimmter Partien früher einsetzte, schneller verlief oder länger anhielt als bei uns. Würden die Kinderschädel vom Neandertaler und modernen Menschen noch gleich aussehen, dann bestünde durchaus die Möglichkeit, dass wir von Neandertalern abstammen. Das vorgegebene Wachstumsschema wäre nur ein wenig mutiert. Zum Beispiel besäßen wir die starken Überaugenwülste nicht, weil dieser Schädelbereich einfach nicht mehr so extrem wächst. Im Grunde würde unser Erwachsenengesicht dann in solchen Merkmalen dem eines jugendlichen Neandertalers gleichen. Evolutionsbiologen sprechen von Neotenie, wenn Jugendmerkmale im Erwachsenenalter bestehen bleiben.

Schon im Kindesalter waren sie anders

Dem gingen Frank L'Engle Williams von der Staatsuniversität von Georgia in Amherst sowie Laurie Godfrey und Mike Sutherland von der Universität von Massachusetts nach. Von den Schädeln von 41 Neandertalern und 294 anatomisch modernen Menschen aller Altersstufen nahmen sie jeweils 24 unterschiedliche Abstandsmaße und gaben die Daten in einen Computer ein. Ihr Ziel war, durch Herumprobieren mit verschiedenen, variierenden Wachstumsschemata eine Abstammung des modernen Menschen vom Neandertaler zu simulieren, wobei diese Entwicklung entweder vom erwachsenen oder vom jugendlichen Neandertaler ausgehen sollte.

Der Versuch schlug fehl. Sowohl eine Evolutionssimulation ausgehend vom Schädel eines erwachsenen Neandertalers als auch eine

von einer jüngeren Altersstufe misslang. Was den Erwachsenenschädel betrifft, so hatte dieser beim Neandertaler zwar größere Ausmaße als der des modernen Menschen. Doch wenn man ihn an den entscheidenden Stellen einschrumpft, erhält man keineswegs die gewünschten modernen Konturen. Der Unterschied berührt also nicht nur die Größe. Die Schädelform des modernen Menschen von der eines jugendlichen Neandertalers herzuleiten konnte genauso wenig gelingen. Die Proportionen sind zu verschieden. Williams' Kommentar dazu lautet: »Als unreif gebliebener Neandertaler taugt der spätere Mensch schlecht!«

Der Befund warf weitere Fragen auf. Wenn Neandertalerkinder schon einen anders geformten Schädel auf die Welt mitbekamen – wuchs der dann später im Prinzip nach dem gleichen Schema wie der von Kindern des modernen *Homo sapiens*? Oder wuchs er nach seinem eigenen Muster weiter?

Die amerikanische Anthropologin Gail Krovitz prüfte das an fossilem Material. Sie unterteilte Schädel der beiden Menschenformen nach der Gebissreife in fünf Altersklassen: bis 3 Jahre, 3 bis 6 Jahre, 6 bis 9 Jahre, 9 bis 13,5 Jahre und älter als 13,5 Jahre. Die Neandertalerfossilien sortierte sie entsprechend dem Entwicklungszustand des modernen Menschen. Da die Forscherin möglichst komplette Schädel benötigte, standen ihr vom Neandertaler nur fünf Exemplare von Kindern und 18 von Erwachsenen zur Verfügung. Vom anatomisch modernen Menschen zog sie zum Vergleich 230 Kinder- und 142 Erwachsenenschädel heran.

Krovitz bestimmte 39 anatomische Fixpunkte, deren Lage zueinander sie ermittelte. Zunächst berechnete sie die relative Position dieser Fixpunkte an den Schädeln jeweils bei den einzelnen Altersklassen – getrennt für Neandertaler und modernen Menschen. Anschließend registrierte sie den Zuwachs der Distanzen zwischen sämtlichen Fixpunkten von einer Altersklasse zur nächsten. Sie erfasste somit, in welchen Bereichen die Schädel in den einzelnen Altersphasen am meisten wuchsen.

Der Unterschied in den Wachstumsmustern war deutlich. Die Neandertaler blieben sich treu, ebenso wie die modernen Menschen. Das heißt, die typischen Proportionsunterschiede im Erscheinungsbild setzten sich über alle Entwicklungsstadien fort – bei allenfalls geringen Verschiebungen. Egal welche Altersklasse man wählte: Das untere Gesicht der Neandertaler war stets länger; ihr Schädel war auf Augenhöhe breiter, ansonsten in der Längsachse (von der Stirn zum Hinterhaupt) länger und in seiner Form flacher, schon bei den kleinen Kindern (siehe Bild auf der linken Seite). Möglicherweise bestehen diese Besonderheiten zumindest zum Teil schon vor der Geburt.

Im Galopp durch die Jugend

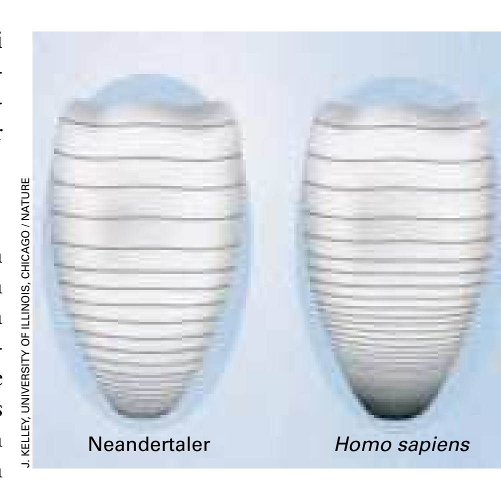
Überdies wuchsen die Schädel der beiden Menschenformen tatsächlich nicht nach dem gleichen Schema. So verlängerte sich beim Neandertaler in den Abschnitten vom Kleinkind bis zum Alter von 9 Jahren vor allem die Gesichtspartie unterhalb der Brauen, und das Untergesicht versetzte sich deutlicher nach vorn. Beim modernen Menschen weitete sich in dieser Zeit der Bereich um die Augen stärker. In der nächsten Altersklasse, zwischen 9 und 13,5 Jahren, verbreiterte sich beim Neandertaler mehr der Bereich um die Augen. Auch die Partie unterhalb der Nasenöffnungen wuchs nun vergleichsweise kräftiger. In dieser Phase streckte sich beim modernen Menschen das gesamte Gesicht in die Länge. Von 13,5 Jahren an setzte sich das relativ stärkere Längen- und Weitenwachstum des Neandertalerschädels fort, wodurch die Mundpartie noch mehr vorsprang.

Diese Unterschiede im Wachstum zeigten sich eindeutig. Krovitz vermutet völlig verschiedene Entwicklungsschemata, die mit der anderen Schädelform des Neugeborenen oder vielleicht schon des Fötus zusammenhängen. »Neandertaler wurden bereits als kleine Neandertaler geboren«, so die Forscherin, »und in der ganzen Zeit des Heranwachsens sorgten Wachstumsmuster dafür, dass sich die charakteristischen Merkmale immer deutlicher ausformten.«

Wer die Jugendentwicklung einer ausgestorbenen Art erforschen möchte, muss sich vor unzähligen Fallen hüten – ganz abgesehen von der Beschränkung auf ein spärliches Fossilmaterial. Doch über die Kindheit des Neandertalers erzählen Zähne und Knochen das Gleiche: Diese Menschen wurden schneller groß als der moderne *Homo sapiens* und durchschritten die Jugendzeit in ihrer besonderen Weise. So wenig sie uns anscheinend genetisch glichen, so wenig erlebten sie die gleiche Kindheit.

Auf die Neandertaler könnte folgende Inschrift passen:

> Thickened, heavy skulls long gone,
> They grew up strange, lived fast, died young
>
> *(Dicke, schwere Schädel, lang vergangen,*
> *seltsam aufgewachsen, schnell gelebt und jung*
> *vom Tod gefangen)* ◁



J. KELLEY, UNIVERSITY OF ILLINOIS, CHICAGO / NATURE

▲ So ähnlich, wenn auch wesentlich schmaler, verteilen sich die Zahnrillen beim Neandertaler und modernen Menschen. Bei Letzterem verzögerte sich die Neubildung von Zahnschmelz nach einiger Zeit deutlich stärker – die Zähne, und vermutlich auch die Kinder selbst, wuchsen nun langsamer.

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE



Pat Shipman ist Anthropologieprofessorin an der Pennsylvania State University in University Park.

Evolution des Menschen II. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/2004

Surprisingly rapid growth in Neandertals. Von Fernando Ramírez Rozzi und José Maria Bermúdez de Castro in: Nature, Bd. 428, S. 936, 29. April 2004

Patterns of growth and development in the genus *Homo*. Von J. L. Thompson, G. E. Krovitz und A. J. Nelson (Hg.). Cambridge University Press, 2003

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die Zukunft des Wetters

Auch Meteorologen haben Träume. Die einen wollen Hurrikane umlenken oder abschwächen, die anderen nicht nur vorhersagen, wie das Wetter der nächsten Tage wird, sondern auch wie die Witterung der folgenden Jahreszeit ausfällt. Hilfe kommt von oben – von neuen Wettersatelliten

EUMETSAT 2005

WEITERE THEMEN IM AUGUST

Frühwarnung im Immunsystem

Völlig unterschätzt haben Forscher bisher die angeborene Immunabwehr. Viele chronische Krankheiten entstehen durch deren Fehlfunktion

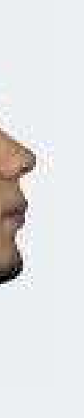
Was erhitzte die Asteroiden?

Viele Kleinplaneten sind nach ihrer Entstehung noch einmal erhitzt worden – möglicherweise in der Frühzeit des Sonnensystems durch Kollisionen der felsigen Himmelskörper untereinander



DON DIXON





MELISSA SZALKOWSKI

Warum schätzen wir uns selbst?

Die Regel lautete: Kein gutes Selbstwertgefühl, kein Erfolg in Beruf und Privatleben. Neuere Studien entlarven diese Faktoren als reinen Mythos

KENN BROWN

Atomchips für Quantencomputer

Forschern des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik gelingt es, ultrakalte Atomwolken (so genannte Bose-Einstein-Kondensate) mit Magnetfeldern über einen Mikrochip zu bugsieren. Solche Chips versprechen Anwendungen als hochpräzise Sensoren für Flugzeuge ebenso wie für Quantencomputer